

OPTIMASI LAJU Pengerjaan Material dan Kekasaran Permukaan Proses EDM *Sinking* BAJA AISI 4140 dengan Menggunakan Metode Taguchi-Fuzzy

Nama Mahasiswa : Zaldy Kurniawan
NRP : 2111201010
Pembimbing : Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.
Co-Pembimbing : Arif Wahjudi, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Laju pengerjaan material (LPM) yang maksimal dan nilai kekasaran permukaan (KP) yang minimal merupakan dua kinerja yang ingin dicapai pada proses EDM *sinking*. Apabila proses EDM *sinking* dilakukan dengan LPM yang rendah, maka KP yang rendah akan didapatkan pula. Tetapi, proses yang berjalan lambat akan berpengaruh terhadap waktu penyelesaian produk dan biaya proses produksi yang harus dikeluarkan. Oleh karena itu, untuk mendapatkan respon LPM yang maksimal dan KP benda kerja yang minimal pengaturan parameter-parameter proses EDM *sinking* yang tepat perlu dilakukan.

Penelitian yang telah dilakukan bertujuan untuk menentukan kontribusi dari parameter-parameter proses EDM *sinking* dalam mengurangi variasi dari respon LPM dan KP benda kerja secara serentak. Selain itu, penentuan kombinasi level-level yang tepat dari parameter-parameter proses EDM *sinking* juga dilakukan agar diperoleh LPM yang maksimal dan KP benda kerja yang minimal. Parameter proses pemesinan yang divariasikan adalah *machining voltage* (*gap voltage*), *energy off time*, *energy on time* dan *working energy* (*pulse current*). Rancangan percobaan yang berupa matrik ortogonal L_{18} ($2^1 \times 3^3$) ditetapkan berdasarkan metode Taguchi. Metode Taguchi-*fuzzy* digunakan untuk melakukan optimasi. Untuk mengatasi faktor gangguan yang terjadi selama proses pemesinan percobaan dilakukan secara acak dengan replikasi sebanyak 2 kali.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk mengurangi variasi dari respon secara serentak, *working energy* (*pulse current*) memiliki persen kontribusi terbesar, yaitu sebesar 48,91%, *energy on time* memiliki persen kontribusi sebesar 13,56% dan *energy off time* memiliki persen kontribusi sebesar 10,98%. *Machining voltage* (*gap voltage*) memiliki persen kontribusi terkecil, yaitu sebesar 9,04%. Untuk memperoleh LPM yang maksimal dan KP benda kerja yang minimal, *machining voltage* atau *gap voltage* diatur sebesar 10 V, *energy off time* diatur sebesar 21 μ s, *energy on time* diatur sebesar 50 μ s dan *working energy* atau *pulse current* diatur sebesar 25 A.

Kata Kunci: EDM *sinking*, kekasaran permukaan (KP), laju pengerjaan material (LPM), metode Taguchi-fuzzy

OPTIMIZATION OF MATERIAL REMOVAL RATE AND SURFACE ROUGHNESS SINKING EDM PROCESS OF STEEL AISI 4140 USING TAGUCHI-FUZZY METHOD

By : Zaldy Kurniawan
Student Identity Number : 2111 201010
Supervisor 1 : Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D
Supervisor 2 : Arif Wahjudi, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

Optimization of multi performance characteristics is a great need of producers of precision parts with a low cost. Rough machining with EDM sinking gives high surface roughness (SR), while finish machining gives low surface roughness but with very slow material removal rate (MRR). Hence, achieving higher MRR along with lower SR can be considered as a multi-objective optimization problem. In this research, the use of the Taguchi method coupled with fuzzy logic has been applied for optimization of multiple quality characteristics. The EDM sinking machining parameters machining voltage (gap voltage), energy off time, energy on time and working energy (pulse current) were optimized with considerations of multiple performance characteristics, i.e., MRR and SR. Based on Taguchi method, an L_{18} mixed-orthogonal array was chosen for the design of experiment. The experiments are completely randomized and replicated twice. A fuzzy reasoning of the multiple performance characteristics has been developed based on fuzzy logic unit. Experimental results have shown that machining performance in the EDM sinking process can be improved effectively through this method 48,91% gives the highest contribution for reducing the total variation of the multiple responses, followed by 13,56%, 10,98% and 9,04% respectively. The maximum MRR and SR could be obtained by using the values of machining voltage (gap voltage), energy off time, energy on time and working energy (pulse current) of 10 V, 21 μ s, 50 μ s and 25 A respectively.

Keywords: EDM sinking, metal removal rate (MRR), surface roughness (SR), Taguchi fuzzy.



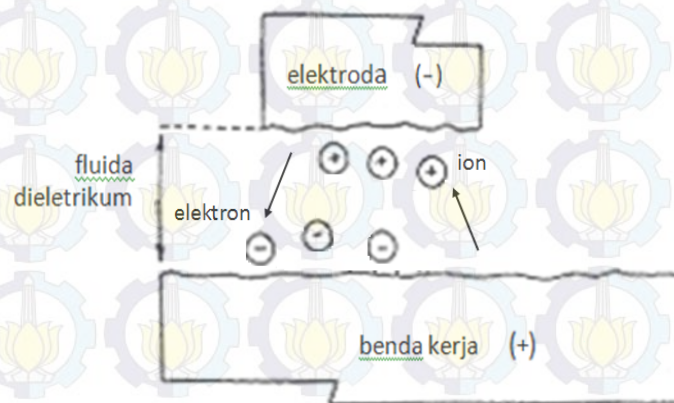
Proses EDM *sinking* adalah proses pengerjaan material yang dikerjakan oleh sejumlah loncatan bunga api listrik yang terjadi pada celah antara elektroda dengan benda kerja. Loncatan bunga api listrik tersebut terjadi tidak secara terus menerus tetapi periodik terhadap waktu. Panas dari loncatan bunga api akan menyebabkan terjadinya pelelehan lokal pada benda kerja dan elektroda atau pahat, kemudian terbawa oleh aliran fluida yang berada pada celah diantara benda kerja dan elektroda. Secara umum proses EDM *sinking* dengan elektroda atau pahat positif ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Proses loncatan bunga api listrik, hingga terjadinya pengikisan benda kerja dan elektroda pada proses EDM *sinking* dapat dijelaskan sebagai berikut:



1. Proses pengisian tegangan potensial pada elektroda dan benda kerja, pada kondisi ini tidak ada arus listrik yang mengalir.
2. Dengan adanya beda potensial yang terjadi diantara benda kerja dan elektroda menyebabkan terjadinya medan listrik. Hal tersebut akan menyebabkan munculnya pergerakan ion positif dan elektron menuju kutub yang berlawanan. Dengan demikian terbentuklah saluran ion yang bersifat konduktif. Proses ionisasi dengan elektroda negatif (DCEN) dilakukan untuk proses *roughing* pada proses EDM *sinking* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Proses ionisasi dengan elektroda negatif Lin dkk. (2002)

Proses terbentuknya saluran ion pada celah antara benda kerja dan elektroda dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Dengan adanya medan listrik antara elektroda dan benda kerja, maka elektron-elektron bebas yang terdapat pada permukaan katoda (elektroda) akan tertarik menuju anoda (benda kerja). Proses menuju anoda, maka elektron-elektron yang berenergi kinetik ini akan bertumbukan dengan molekul-molekul dielektrik.
2. Proses tumbukan antara elektron bebas dengan molekul dielektrik terjadi dua macam kondisi. Proses tumbukan tersebut antara lain:
 - a. Tumbukan biasa, maka menyebabkan elektron berkurang energi kinetiknya.
 - b. Jika energi kinetik elektron bebas sedemikian tingginya, maka proses tumbukan menghasilkan elektron baru yang berasal dari molekul dielektrik,



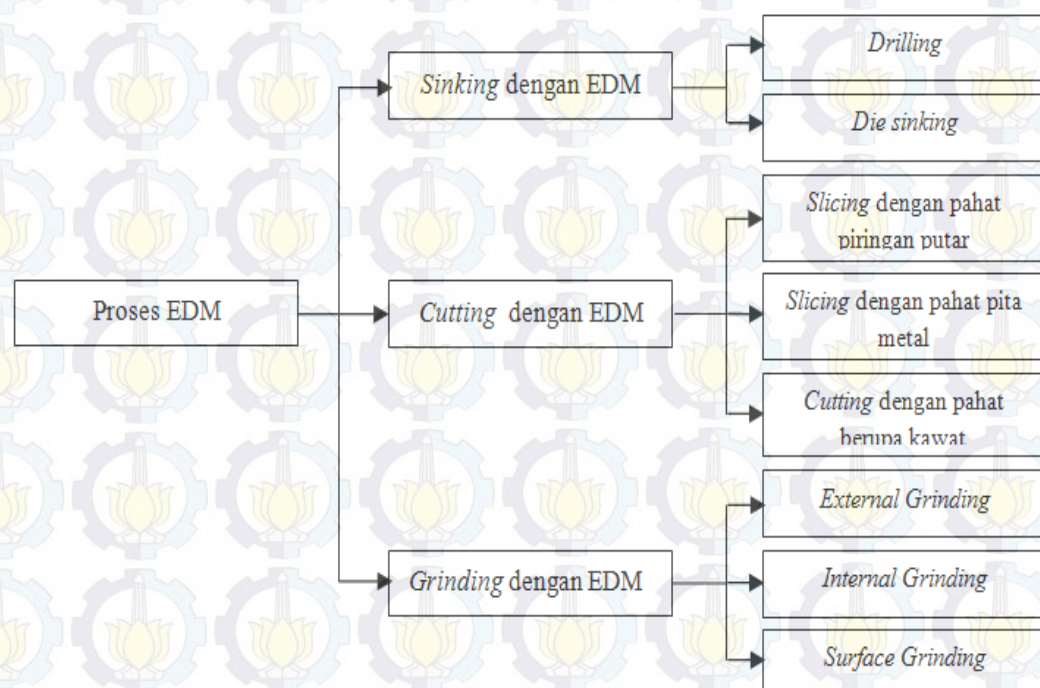
molekul dielektrik yang telah kehilangan elektron tersebut akan menjadi ion bermuatan positif dan akan tertarik ke arah katoda (-).

3. Dengan terjadinya proses tumbukan elektron dan molekul, maka akan menghasilkan elektron-elektron baru, Elektron-elektron tersebut membentuk ion-ion baru sehingga terbentuklah saluran ion.
4. Dengan terbentuknya saluran ion, maka tahanan listrik pada saluran tersebut menjadi rendah sekali sehingga terjadilah pelepasan energi listrik dalam waktu yang singkat berupa loncatan bunga api listrik.

Proses EDM *sinking* mempunyai kemampuan dasar, diantaranya adalah:

1. Mampu mengerjakan material atau paduan yang sangat keras yang tidak mampu untuk dikerjakan dengan proses pemesinan konvensional.
2. Mampu mengerjakan material dengan bentuk yang kompleks, serta dengan tingkat kepresisian yang tinggi dengan dimensi yang sama secara berulang-ulang selama proses pembentukan.

Secara garis besar proses pengerjaan dengan proses EDM dapat dikelompokkan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Bagan pengelompokan proses EDM Pandey dan Shan (1980)



2.2.1. Elektroda atau pahat

Elektroda atau pahat yang baik adalah memiliki temperatur *melting* yang tinggi dan tahanan listriknya rendah. Setiap material yang bersifat konduktor listrik dapat dipergunakan sebagai elektroda atau pahat didalam proses EDM *sinking*. Secara umum elektroda atau pahat pada proses EDM *sinking* dibagi menjadi dua, yakni kelompok metalik dan grafit.

Ada beberapa logam dari kelompok metalik biasanya digunakan sebagai elektroda (Guitrau, 1997).

- *Brass/Zinc*

Brass memiliki keausan yang tinggi. Karena tingginya tingkat keausan yang terjadi, maka dalam penggunaannya *brass/zinc* dilapisi dengan *copper* setebal 0,005 hingga 0,1 *inch*.

- *Copper*

Copper memiliki resistensi listrik yang rendah, tetapi titik lelehnya juga rendah yaitu 1083 °C. Semakin rendah resistensi listrik yang dimiliki elektroda, maka akan menyebabkan LPM semakin cepat. Semakin tinggi titik leleh yang dimiliki elektroda, maka akan menyebabkan semakin rendah laju keausan elektroda. Penggunaan *copper* sering dilakukan dengan menambahkan unsur *telurium* antara 0,5 sampai 1%, dengan tujuan untuk mempermudah proses pemesinan.

- *Tungsten*

Tungsten murni memiliki resistensi listrik yang sangat tinggi, tetapi titik *melting*nya sangat tinggi yaitu 3370 °C. *Tungsten* murni umumnya digunakan untuk proses pembuatan lubang kecil.

- *Copper Tungsten*

Paduan antara *copper* dan *tungsten* akan menghasilkan keausan elektroda yang rendah, selain itu resistensi listriknya juga rendah. Keausan elektroda yang rendah didapat karena pengaruh elemen *tungsten*, sedangkan resistensi listrik yang rendah didapat karena pengaruh elemen *copper*.

Rasio antara *tungsten* dan *copper* yang sering digunakan untuk elektroda adalah 70/30.



- *Silver Tungsten*

Elektroda *silver tungsten* menghasilkan paduan yang memiliki resistensi yang lebih kecil dari *copper tungsten*, namun ketahanan terhadap keausannya sama. Karena mahalanya maka paduan ini digunakan hanya untuk kondisi tertentu saja.

- Grafit

Elektroda grafit memiliki ketahanan termal yang sangat tinggi. Hal tersebut ditunjukkan pada titik yang tinggi yaitu pada temperatur 3700 °C. Grafit tidak mengalami *melting* tetapi langsung berubah ke gas. Dengan adanya tahanan termal akan menyebabkan keausan elektroda pada grafit sangat kecil.

Penggunaan elektroda dari metalik dan grafit tergantung dari spesifikasi produk yang akan diproses dengan menggunakan mesin EDM *sinking*.

Keuntungan dari penggunaan elektroda metalik dan grafit antara lain:

- Elektroda metalik

Harganya murah, kekuatannya tinggi, proses pemesinannya aman, ukuran butirnya sangat kecil sehingga memungkinkan untuk proses *mirror finishing*.

- Elektroda grafit

Mudah untuk diproses pemesinan, kecepatan LPM yang tinggi, ketahanan terhadap keausan sangat baik, dapat terkikis dengan menggunakan mesin ultrasonik.

Kerugian dari penggunaan elektroda metalik dan grafit antara lain:

- Elektroda metalik

Indeks kemampuan untuk digerinda rendah, terjadi *burr*, kecepatan proses pemesinan yang lambat, tingkat keausannya tinggi.

- Elektroda grafit

Elektroda grafit akan menghasilkan keausan yang sangat rendah pada frekuensi rendah. Harganya mahal, debu dari hasil pengerjaannya cukup berbahaya walaupun tidak beracun, grafit adalah material yang getas sehingga harus berhati-hati sewaktu membuat pahat dengan sisi yang tajam.

Penggunaan elektroda grafit tidak semudah penggunaan elektroda yang terbuat dari metalik. Apabila mesin EDM tersebut dioperasikan pada



frekuensi tinggi maka akan menyebabkan laju keausan elektroda yang tinggi, bahkan lebih tinggi dari pada keausan elektroda metalik.

2.2.2. Laju pengerjaan material (LPM)

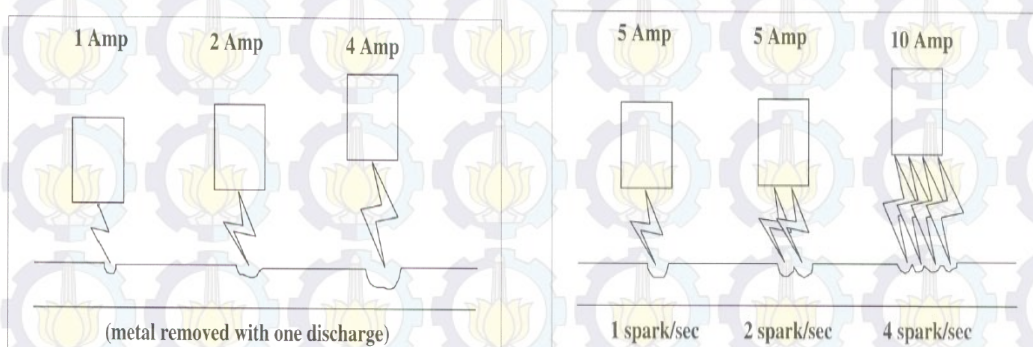
Laju pengerjaan material (LPM) adalah proses terjadinya pembentukan kawah-kawah halus pada permukaan benda kerja. Parameter-parameter yang mempengaruhi LPM adalah frekuensi *discharge*, banyaknya arus dan tegangan listrik tiap *discharge*, material elektroda, material benda kerja dan kondisi *flushing* fluida dielektrik. Krar dan Check (1997).

LPM dapat didefinisikan sebagai besarnya volume material yang terbang tiap satuan waktu (mm^3/min) dan dirumuskan sebagai berikut:

$$LPM = \frac{\text{Volume material yang terbang}}{\text{Waktu pengerjaan}} \quad (\text{mm}^3/\text{min}) \quad (2.1)$$

2.2.3. Kekasaran permukaan (KP)

Kekasaran permukaan (KP) didefinisikan sebagai ketidakaturan kontur permukaan pada suatu benda atau bidang. Kontur permukaan yang dihasilkan dari proses pemesinan EDM *sinking* adalah kontur permukaan yang bentuknya berupa kawah-kawah kecil pada suatu permukaan. Besar kecilnya kawah yang dihasilkan pada proses pemesinan EDM *sinking* tergantung pada energi listrik yang terkandung pada setiap loncatan bunga api listrik. Pengaruh besarnya arus dan frekuensi terhadap hasil akhir permukaan benda kerja seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4.

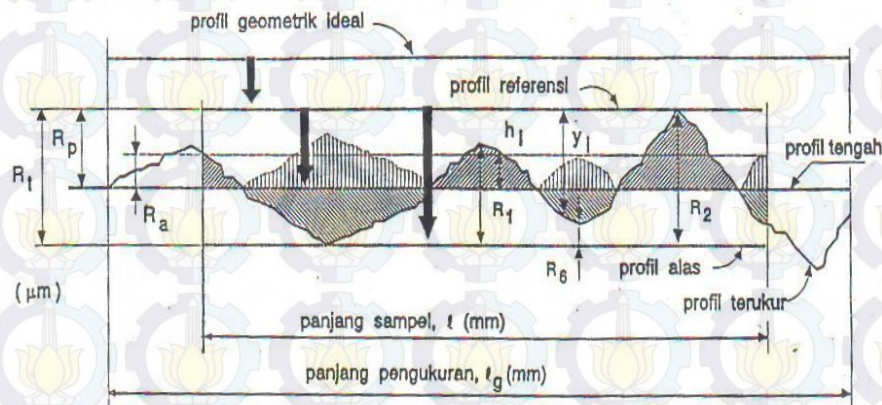


Gambar 2.4 Pengaruh arus listrik dan frekuensi terhadap bentuk kawah (Krar dan Check 1997)



Gambar 2.4 menunjukkan penggunaan arus yang lebih besar pada frekuensi yang sama akan menghasilkan kawah yang lebih besar, sehingga menyebabkan terbentuknya permukaan yang lebih kasar dan LPM yang lebih tinggi. Akan tetapi, jika frekuensi yang digunakan semakin besar untuk arus konstan, maka akan dihasilkan permukaan benda kerja yang lebih halus.

Adapun profil-profil pada KP seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Parameter KP (Rochim, 1993)

Nilai penyimpangan rata-rata aritmatika telah diklasifikasikan oleh ISO menjadi 12 tingkat kekasaran. Tingkat kekasaran ini dilambangkan dari N1 hingga N12 seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1.

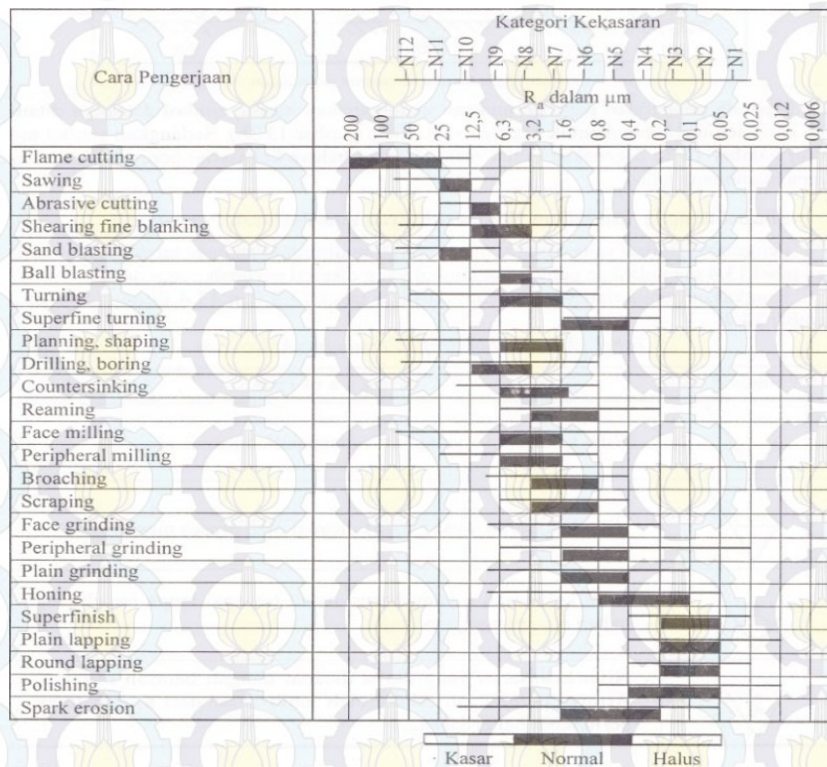
Tabel 2.1 Nilai Kekasaran dan Tingkat Kekasaran (Rochim, 2001)

Kekasaran (μm)	Tingkat kekasaran	Panjang sampel (mm)
50	N12	8
25	N11	
12,5	N10	2,5
6,3	N9	
3,2	N8	0,8
1,6	N7	
0,8	N6	
0,4	N5	
0,2	N4	0,25
0,1	N3	
0,05	N2	
0,025	N1	0,08



Beberapa nilai contoh kekasaran yang dapat dicapai oleh beberapa cara pengerjaan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Nilai Kekasaran yang Dicapai Oleh Beberapa Pengerjaan
(Rochim, 2001)



Keterangan:

Kasar = Nilai KP yang dicapai dengan pengerjaan kasar.

Normal = Nilai KP yang dicapai dengan pengerjaan normal.

Halus = Nilai KP yang dicapai dengan pengerjaan khusus.

Profil dari permukaan yang sempurna dapat berupa garis lurus, lengkung atau busur. Profil semacam ini dapat dikatakan sebagai profil geometri ideal (*geometrical ideal profile*). Permukaan yang sesungguhnya (*real surface*) tidak dapat dibuat duplikatnya melainkan hanya mendekati bentuk yang sesungguhnya, yang disebut sebagai permukaan terukur (*measured surface*).

Profil yang berupa garis lurus atau garis dengan bentuk sesuai dengan profil geometri ideal serta menyinggung puncak tertinggi dari profil terukur dalam suatu panjang sampel disebut dengan profil referensi. Profil ini digunakan acuan untuk menganalisis ketidakaturan konfigurasi permukaan. Profil dengan bentuk



yang sama, bila digeser ke arah tegak lurus profil geometris ideal dan menyinggung titik terendah profil terukur disebut profil alas.

Profil tengah adalah profil dengan bentuk seperti profil referensi yang terletak diantara profil referensi dan profil alas. Letak profil ini menyebabkan jumlah luas bagi daerah-daerah diatas profil tengah sampai ke profil terukur sama dengan jumlah dari daerah-daerah dibawah profil tengah sampai ke profil terukur.

Parameter-parameter KP dapat dihitung berdasarkan kedudukan antar profil kedalaman total (R_t/R_{Max}) dihitung berdasarkan kedudukan antara profil referensi dan profil dasar. Sedangkan kekasaran rata-rata secara aritmetis (R_a) dihitung berdasarkan harga rata-rata dari nilai absolut jarak antara profil terukur dengan profil tengah. Secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum y (\mu m) \quad (2.2)$$

2.2.4. Pembilasan geram (*Flushing*)

Flushing adalah proses penyirkulasian dari fluida dielektrik yang mengalir pada celah antara pahat dengan benda kerja (Bagiasna, 1979). Metode *flushing* yang tepat akan meningkatkan efisiensi proses pengerjaan material. Dengan demikian *flushing* akan membawa partikel-partikel geram yang dihasilkan keluar dari celah antara benda kerja dan elektroda. Apabila tidak ada *flushing*, maka akan terjadi penimbunan partikel-partikel geram pada celah antara elektroda dengan benda kerja, sehingga akan menimbulkan pengaruh antara lain:

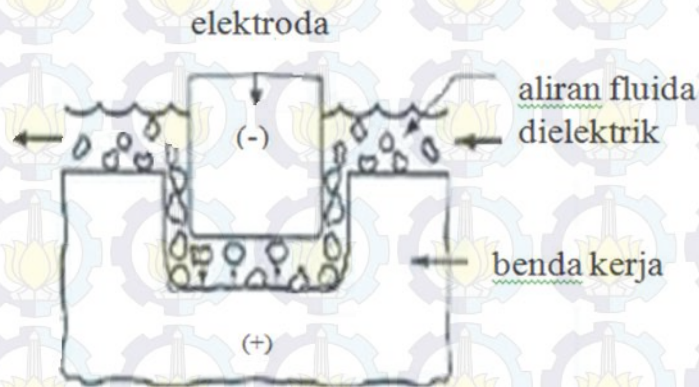
1. Terjadi proses loncatan bunga api listrik secara tidak normal.
2. Terjadi efek hubungan singkat antara elektroda dan benda kerja.
3. Terjadinya busur api listrik antara elektroda dan benda kerja, maka akan merusak elektroda dan benda kerja.

Fluida dielektrik pada proses pemesinan EDM *sinking* mempunyai beberapa fungsi, antara lain:

1. Dalam keadaan terionisasi, fluida dielektrik ini berubah menjadi konduktor sehingga memungkinkan terjadinya loncatan bunga api listrik.



2. Untuk mengeluarkan geram-geram yang terjadi didalam proses pengerjaan material. Gambar 2.6 menunjukkan aliran fluida dielektrik yang terjadi pada proses EDM *sinking*.



Gambar 2.6 Aliran fluida dielektrik proses EDM *sinking* (Bagiasna, 1979)

Ada 4 tipe sistem *flushing* pada EDM *sinking* antara lain (Bagiasna, 1979):

1. *Flushing* injeksi (*injection flushing*), didalam metode ini fluida dielektrik disemprotkan kedalam celah melalui suatu saluran yang dibuat pada benda kerja atau pahat. Kelemahan dari sistem ini adalah terjadi efek *tapering* akibat adanya loncatan bunga api listrik pada sisi-sisi elektroda ketika fluida dielektrik melalui celah elektroda dan material benda kerja.
2. *Flushing* penghisapan (*suction flushing*), didalam metode ini fluida dielektrik dihisap melalui saluran yang dibuat pada benda kerja maupun yang dibuat pada elektroda.
3. *Flushing* sisi (*side flushing*), didalam metode ini menggunakan nozel yang bisa mengarahkan aliran dielektrik, sehingga terjadi *flushing* yang baik pada daerah pengerjaan material benda kerja.
4. *Flushing* kombinasi (*combination flushing*), didalam metode ini merupakan kombinasi antara metode penghisapan dengan injeksi, metode ini digunakan untuk mengerjakan cetakan yang berdimensi besar dan dibutuhkan elektroda yang besar pula.

Fluida dielektrik yang digunakan pada proses pemesinan EDM harus memenuhi persyaratan antara lain (Bagiasna, 1979):



1. Sebagai pendingin antara elektroda dan benda kerja .
2. Dalam keadaan terionisasi, fluida dielektrik ini adalah semacam konduktor sehingga memungkinkan terjadinya loncatan bunga api listrik.
3. Sebagai media pendingin didalam proses *quenching* permukaan benda kerja.
4. Untuk mengeluarkan geram-geram yang terjadi didalam proses pengerjaan benda kerja.
5. Membantu proses pengerjaan benda kerja.

Secara umum terdapat dua macam fluida dielektrik yang biasa digunakan pada proses pemesinan EDM antara lain (Bagiasna, 1979):

a. Air (*aqua-destilasi*)

Jenis ini dipergunakan untuk proses pengerjaan benda kerja yang kecil (*micro machining*), misalnya pengerjaan dengan mesin EDM yang mempergunakan elektroda kawat proses pemesinan *wire electrical discharge machining* (WEDM)

b. *Liquid* dengan senyawa hidrokarbon

Senyawa hidrokarbon umumnya digunakan untuk proses pemesinan EDM *sinking*. Ada dua macam *liquid* senyawa hidrokarbon yang sering digunakan untuk proses pemesinan EDM , yaitu:

- Minyak-mineral (*mineral oil*)

Minyak-mineral digunakan secara luas dalam proses pemesinan EDM *sinking* dan memberikan hasil yang baik bila tidak ditambahkan zat pencampur. Viskositas minyak mineral ini perlu diperhatikan dengan pertimbangan sebagai berikut: bila viskositasnya tinggi, maka fluida dielektrik akan sulit mengalir melalui celah yang sempit, tetapi akan memberikan efisiensi tinggi untuk proses *roughing*. Parameter-parameter lain yang penting adalah titik api, dimana titik api yang rendah akan menyebabkan mudahnya pembentukan gelembung-gelembung uap yang mengakibatkan menurunnya LPM dalam proses pemesinan EDM *sinking*.

- Kerosene

Kerosene mempunyai viskositas rendah sehingga cocok untuk pengerjaan *finishing* dan *super finishing*. Untuk benda kerja dari *tungsten* karbida dianjurkan menggunakan kerosene sebagai fluida dielektrik.



2.2.5. Parameter proses

Parameter-parameter proses yang dapat diatur pada mesin EDM *sinking* Hitachi H-DS 02 S, diantaranya adalah:

1. *Machining voltage* atau *gap voltage*

Machining voltage atau *gap voltage* merupakan tegangan yang digunakan untuk mengatur jarak celah diantara benda kerja dan elektroda pada proses EDM. *Machining voltage* atau *gap voltage* yang optimal akan menghasilkan loncatan bunga api listrik yang stabil untuk proses pengikisan material.

2. *Energy off time*

Energy off time merupakan durasi istirahat. Secara aktual bekerjanya mesin EDM *sinking* hanya pada saat pengeluaran geram antara elektroda dan benda kerja sebelum loncatan bunga api listrik yang selanjutnya. *Energy off time* menyebabkan arus listrik *off*, temperatur benda kerja menurun dan memungkinkan terjadinya ionisasi dielektrik. Nilai *energy off time* yang rendah akan meningkatkan *machining speed*, sehingga LPM akan meningkat.

3. *Energy on time*

Energy on time merupakan tahapan pengikisan pada proses EDM. Nilai *energy on time* yang tinggi akan menyebabkan terjadinya peloncatan bunga api yang lebih lama. Panas yang diterima oleh benda kerja akan semakin meningkat, sehingga luasan daerah kerja yang dilelehkan semakin besar. Kondisi ini menyebabkan LPM akan meningkat.

4. *Working energy* atau *pulse current*

Working Energy atau *pulse current* merupakan besarnya arus listrik yang digunakan pada proses EDM. Nilai maksimum untuk besarnya arus ditentukan oleh luas permukaan pemotongan. Semakin besar arus listrik yang dialirkan, maka semakin besar pula energi listrik yang dilepaskan, sehingga luasan daerah benda kerja yang mampu dilelehkan semakin besar. Akibatnya LPM akan meningkat dan KP yang terjadi akan semakin kasar.

2.3. Metode Taguchi

Metode Taguchi merupakan metodologi dalam bidang teknik untuk memperbaiki proses, karakteristik benda kerja dan dapat menekan biaya dan



resources seminimal mungkin. Metode Taguchi berupaya mencapai sasaran tersebut dengan menjadikan benda kerja dan proses tidak sensitif terhadap berbagai parameter gangguan (*noise*), seperti material, perlengkapan manufaktur, tenaga kerja manusia, dan kondisi-kondisi operasional (Soejanto, 2009). Metode Taguchi menjadikan benda kerja dan proses mempunyai sifat kokoh (*robust*) terhadap parameter-parameter gangguan tersebut. Oleh karena itu, metode Taguchi juga disebut *robust design*.

Metode Taguchi mempunyai beberapa kelebihan bila dibandingkan dengan metode desain percobaan lainnya (Soejanto, 2009). Kelebihan tersebut diantaranya:

1. Dapat memperoleh proses yang menghasilkan benda kerja yang tetap dan kokoh terhadap parameter-parameter yang tidak dapat dikontrol.
2. Lebih efisien karena dapat melaksanakan penelitian dengan memperbanyak parameter dan level parameter.
3. Menghasilkan kesimpulan mengenai level dari parameter kontrol yang menghasilkan respon optimal.

Dengan demikian, metode Taguchi mempunyai struktur rancangan yang sangat kompleks, sehingga pemilihan rancangan percobaan harus dilakukan secara hati-hati dan sesuai dengan tujuan penelitian.

Desain percobaan adalah proses mengevaluasi dua parameter atau lebih secara serentak terhadap kemampuannya untuk mempengaruhi rata-rata hasil gabungan dari karakteristik produk atau proses tertentu (Soejanto, 2009). Dengan adanya penentuan parameter yang tepat, maka pengaturan parameter-parameter dan level parameter dibuat bervariasi sehingga hasil dari kombinasi penentuan parameter tertentu dapat diamati dan hasil pengujian sehingga dapat dianalisis. Hasil analisis ini akan digunakan untuk menentukan level-level parameter dan parameter-parameter yang berpengaruh secara signifikan terhadap respon.

2.4. Prosedur Percobaan

Secara umum, desain percobaan Taguchi dibagi menjadi tiga tahap utama yang mencakup semua pendekatan percobaan. Ketiga tahap tersebut adalah sebagai berikut (Soejanto, 2009):



1. Tahap perencanaan

Tahap perencanaan merupakan tahap terpenting. Tahap ini seseorang peneliti dituntut untuk mempelajari percobaan-percobaan yang pernah dilakukan sebelumnya. Kecermatan pada tahap ini akan menghasilkan percobaan yang memberikan informasi positif atau negatif. Informasi positif terjadi apabila hasil percobaan memberikan indikasi bahwa parameter dan level yang mengarah pada peningkatan performansi produk. Informasi negatif terjadi apabila hasil percobaan gagal memberikan indikasi bahwa parameter-parameter yang mempengaruhi respon. Tahap ini terdiri dari beberapa langkah (Soejanto, 2009):

a. Perumusan masalah

Masalah harus dirumuskan secara spesifik. Perumusan masalah harus jelas secara teknis sehingga dapat dituangkan ke dalam percobaan yang akan dilakukan.

b. Penentuan tujuan percobaan

Tujuan percobaan merupakan jawaban masalah yang telah dirumuskan.

c. Penentuan respon

Respon memiliki nilai yang tergantung pada parameter-parameter lain yang disebut parameter bebas.

d. Pengidentifikasian parameter bebas

Parameter bebas adalah parameter yang perubahannya tidak tergantung pada parameter lain. Pada langkah ini, akan dipilih parameter-parameter yang akan diselidiki pengaruhnya terhadap respon yang bersangkutan. Dalam suatu percobaan, tidak semua parameter yang diperkirakan mempengaruhi respon harus diselidiki. Dengan demikian, percobaan dapat dilaksanakan secara efektif dan efisien.

e. Pemisahan parameter kontrol dan parameter gangguan

Parameter-parameter yang diamati dapat dibagi menjadi parameter kontrol dan parameter gangguan. Dalam desain percobaan metode Taguchi, keduanya perlu diidentifikasi dengan jelas, oleh karena itu pengaruh antar kedua parameter tersebut berbeda. Parameter kontrol adalah parameter-



parameter yang nilainya dapat dikendalikan. Faktor gangguan adalah parameter-parameter yang nilainya tidak dapat dikendalikan.

f. Penentuan jumlah dan nilai level parameter

Pemilihan jumlah level akan mempengaruhi ketelitian hasil dan biaya pelaksanaan percobaan. Semakin banyak level yang diteliti maka hasil percobaan yang diperoleh akan semakin akurat, tetapi biaya yang harus dikeluarkan akan semakin banyak.

g. Perhitungan derajat kebebasan

Derajat kebebasan adalah sebuah konsep untuk mendeskripsikan seberapa besar percobaan harus dilakukan dan seberapa banyak informasi yang dapat diberikan oleh percobaan tersebut. Perhitungan derajat kebebasan dilakukan untuk menentukan jumlah percobaan yang akan dilakukan untuk menyelidiki parameter yang diamati. Derajat kebebasan dari matriks ortogonal (v_{mo}) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_{mo} = \text{jumlah percobaan} - 1 \quad (2.3)$$

Derajat kebebasan dari parameter dan level (v_{fl}) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_{fl} = \text{jumlah level parameter} - 1 \quad (2.4)$$

h. Pemilihan matriks ortogonal

Pemilihan matriks ortogonal yang sesuai ditentukan oleh jumlah derajat kebebasan dari jumlah parameter dan jumlah level parameter. Matriks ortogonal memiliki kemampuan untuk mengevaluasi sejumlah parameter-parameter dengan jumlah percobaan yang minimum. Suatu matriks ortogonal dilambangkan dalam bentuk:

$$L_a(b^c) \quad (2.5)$$

Dengan:

L = Rancangan bujursangkar latin

a = Banyaknya percobaan

b = Banyaknya level parameter

c = Banyaknya parameter



Matriks ortogonal $L_{18} (2^1 \times 3^3)$ adalah salah satu matriks ortogonal standar dengan beberapa level gabungan. Matriks ortogonal $L_{18} (2^1 \times 3^3)$ ditunjukkan pada Tabel 2.3. Kolom pertama terdiri dari dua level, dan ketiga kolom yang lainnya terdiri dari tiga level (Soejanto, 2009).

Tabel 2.3 Matriks Ortogonal untuk $L_{18} (2^1 \times 3^3)$

No. Percobaan	Kolom Parameter			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2

2. Tahap Pelaksanaan

Tahap pelaksanaan terdiri dari dua hal, yaitu penentuan jumlah replikasi dan randomisasi pelaksanaan percobaan (Soejanto, 2009).

a. Jumlah Replikasi

Replikasi adalah pengulangan kembali perlakuan yang sama pada kondisi yang sama dalam sebuah percobaan untuk mendapatkan ketelitian yang lebih tinggi, mengurangi tingkat kesalahan serta memperoleh harga taksiran dari kesalahan.

b. Randomisasi

Pengaruh parameter-parameter lain yang tidak diinginkan atau tidak dapat dikendalikan selalu ada dalam sebuah percobaan. Pengaruh itu dapat



diperkecil dengan menyebarkan parameter-parameter tersebut melalui randomisasi atau pengacakan urutan percobaan. Randomisasi dilakukan dengan tujuan untuk menyebarkan pengaruh dari parameter-parameter yang tidak dapat dikendalikan pada semua unit percobaan. Randomisasi memberikan kesempatan yang sama pada semua unit percobaan untuk menerima suatu perlakuan sehingga ada kehomogenan pengaruh dari setiap perlakuan yang sama. Selain itu, randomisasi juga bertujuan mendapatkan hasil percobaan yang bebas satu sama lain. Apabila replikasi bertujuan untuk memungkinkan dilakukannya uji signifikansi, maka randomisasi bertujuan untuk memberikan validasi terhadap uji signifikansi tersebut dengan menghilangkan sifat bias.

3. Tahap analisis

Pada tahap analisis, pengumpulan dan pengolahan data dilakukan. Tahap ini meliputi pengumpulan data, pengaturan data, perhitungan serta penyajian data dalam suatu tampilan tertentu yang sesuai dengan desain yang dipilih. Selain itu, perhitungan dan pengujian data statistik dilakukan pada data hasil percobaan.

a. Analisis variansi

Analisis variansi (ANOVA) adalah teknik yang digunakan untuk menganalisis data yang telah disusun dalam desain secara statistik (Soejanto, 2009). Analisis ini dilakukan dengan menguraikan seluruh variansi atas bagian-bagian yang diteliti. Pada tahap ini, pengklasifikasian hasil percobaan dilakukan secara statistik sesuai dengan sumber variasi yang diteliti, sehingga dapat mengidentifikasi kontribusi parameter. Dengan demikian akurasi perkiraan model dapat ditentukan. ANOVA pada matriks ortogonal dilakukan berdasarkan perhitungan jumlah kuadrat untuk masing-masing kolom. ANOVA digunakan untuk menganalisis data percobaan yang terdiri dari dua parameter atau lebih dengan dua level atau lebih. Tabel ANOVA terdiri dari perhitungan derajat kebebasan (db), jumlah kuadrat (*sum of square*, SS), kuadrat tengah (*mean of square*, MS), dan F_{hitung} seperti ditunjukkan pada Tabel 2.4.



Tabel 2.4 Analisis Variansi

Sumber variasi	Db	SS	MS	F_{hitung}
Parameter A	v_A	SS_A	MS_A	F_A
Parameter B	v_B	SS_B	MS_B	F_B
Error	v_{error}	SS_{error}	MS_{error}	
Total	v_T	SS_T		

Dengan:

$$v_T = \text{Derajat bebas total.} \\ = N - 1 \quad (2.6)$$

$$v_A = \text{Derajat bebas parameter A.} \\ = k_A - 1 \quad (2.7)$$

$$v_B = \text{Derajat bebas parameter B.} \\ = k_B - 1 \quad (2.8)$$

$$v_{error} = \text{Derajat bebas error.} \\ = v_T - v_A - v_B - v_{AB} \quad (2.9)$$

$$T = \text{Jumlah keseluruhan.} \\ = \sum_{i=1}^N y_i \quad (2.10)$$

$$CF = \text{Parameter koreksi.} \\ = \frac{T^2}{N} \quad (2.11)$$



SS_T = Jumlah kuadrat total.

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=1}^N Y_i - CF \\ &= \sum_{i=1}^N (Y_i - T)^2 \end{aligned} \quad (2.12)$$

SS_A = Jumlah kuadrat parameter A.

$$= \left[\sum_{i=1}^{kA} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - CF \quad (2.13)$$

SS_B = Jumlah kuadrat parameter B.

$$= \left[\sum_{i=1}^{kB} \left(\frac{B_i^2}{n_{B_i}} \right) \right] - CF \quad (2.14)$$

SS_E = Jumlah kuadrat *error*.

$$= SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (2.15)$$

MS_A = Kuadrat tengah parameter A.

$$= \frac{SSA}{\nu A} \quad (2.16)$$

MS_B = Kuadrat tengah parameter B.

$$= \frac{SSB}{\nu B} \quad (2.17)$$

MS_E = Kuadrat tengah *error*.

$$= \frac{SSE}{\nu E} \quad (2.18)$$



Dengan:

k_A = Jumlah level parameter A

k_B = Jumlah level parameter B

N = Jumlah total percobaan

n_{Ai} = Jumlah total pengamatan parameter A

n_{Bj} = Jumlah total pengamatan parameter B

b. Uji distribusi F

Pengujian distribusi F digunakan dengan tujuan untuk menunjukkan bukti adanya perbedaan pengaruh masing-masing parameter dalam percobaan (Soejanto, 2009). Pengujian ini dilakukan dengan cara membandingkan variansi yang disebabkan oleh masing-masing parameter dan variansi *error*. Variansi *error* adalah variansi setiap individu dalam pengamatan yang timbul karena parameter-parameter yang tidak dapat dikendalikan. Hipotesis yang digunakan dalam pengujian ini untuk parameter yang tidak diambil secara random (*fixed*) adalah:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$$

H_1 : sedikitnya ada satu pasangan μ yang tidak sama

Kegagalan menolak H_0 mengindikasikan tidak adanya perbedaan rata-rata dari nilai respon yang dihasilkan pada perlakuan yang berbeda, sedangkan penolakan H_0 mengindikasikan adanya perbedaan rata-rata dari nilai respon tersebut. Selain itu juga, karena respon pada setiap percobaan dapat dimodelkan dalam bentuk (Montgomery, 2009):

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk} \quad (2.19)$$

maka hipotesis yang juga dapat digunakan dalam pengujian ini adalah

Untuk taraf parameter A $\rightarrow H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_k = 0$

H_1 : paling sedikit ada satu τ tidak sama dengan 0

Untuk taraf parameter B $\rightarrow H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$

H_1 : paling sedikit ada satu β tidak sama dengan 0

Kegagalan menolak H_0 mengindikasikan tidak adanya pengaruh parameter A dan parameter B terhadap respon, sedangkan penolakan H_0 mengindikasikan



adanya pengaruh parameter A dan parameter B terhadap respon. Kegagalan menolak atau penolakan H_0 didasarkan pada nilai F_{hitung} yang dirumuskan (Soejanto, 2009):

$$\text{Untuk taraf parameter A} \rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_A}{MS_E} \quad (2.20)$$

$$\text{Untuk taraf parameter B} \rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_B}{MS_E} \quad (2.21)$$

Penolakan terhadap H_0 pada masing-masing kasus dilakukan jika mengalami kondisi sebagai berikut:

$$\text{Untuk taraf parameter A} \rightarrow F_{hitung} > F_{\alpha, v_A, v_E} \quad (2.22)$$

$$\text{Untuk taraf parameter B} \rightarrow F_{hitung} > F_{\alpha, v_B, v_E} \quad (2.23)$$

Bila menggunakan perangkat komputasi statistik, penolakan terhadap H_0 dilakukan jika $p\text{-value}$ lebih besar dari pada α (taraf signifikansi). Penolakan terhadap H_0 dilakukan jika nilai F lebih besar dari dua (Park, 1996). Analisis Pemeriksaan Asumsi Residual. Residual didefinisikan sebagai selisih antara nilai pengamatan dan nilai dugaannya $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$ (Montgomery, 2009). Dalam analisis regresi terdapat asumsi bahwa residual bersifat bebas satu sama lain atau independen, mempunyai rata-rata sama dengan nol atau mendekati nol dan varian yang konstan σ^2 (identik), serta berdistribusi normal atau $\varepsilon_i \sim IIDN(0, \sigma^2)$. Oleh karena itu, pemeriksaan asumsi harus dilakukan dalam setiap pendugaan model untuk mengetahui asumsi tersebut terpenuhi atau tidak.

1. Pengujian independen

Pengujian independen digunakan untuk menjamin bahwa pengamatan telah dilakukan secara acak, yang berarti antar pengamatan tidak ada korelasi (*independent*). Pemeriksaan asumsi ini dilakukan dengan menggunakan plot *auto correlation function* (ACF). Residual bersifat independen jika nilai korelasi berada dalam interval $\pm \frac{2}{\sqrt{n}}$.



2. Pengujian identik

Pengujian identik bertujuan untuk memenuhi apakah residual mempunyai penyebaran yang sama. Hal ini dilakukan dengan memeriksa plot e_i terhadap \hat{Y}_i (secara visual). Jika penyebaran datanya acak (menyebar disekitar garis nol) dan tidak menunjukkan pola-pola tertentu, maka asumsi identik terpenuhi.

3. Pengujian distribusi normal

Normal probability plot pada perangkat komputasi statistik dapat digunakan untuk menyatakan residual suatu respon berdistribusi normal atau tidak. *Kolmogorov-Smirnov normality test* digunakan dalam pengujian kenormalan residual. Hipotesa yang digunakan adalah:

H_0 : residual berdistribusi normal.

H_1 : residual tidak berdistribusi normal.

H_0 ditolak jika $p\text{-value}$ lebih kecil dari pada $\alpha = 0,05$.

c. Rasio S/N

Rasio S/N (*signal to noise*) digunakan untuk memilih parameter-parameter yang memiliki kontribusi pada pengurangan variasi suatu respon. Rasio S/N merupakan rancangan untuk transformasi pengulangan data ke dalam suatu nilai yang merupakan ukuran variasi yang timbul. Rasio S/N tergantung dari jenis karakteristik kualitas, yaitu (Soejanto, 2009):

1) Semakin kecil semakin baik

Adalah karakteristik kualitas dengan batas nilai 0 dan non-negatif sehingga nilai yang semakin kecil atau mendekati nol adalah nilai yang diinginkan.

Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right] \quad (2.24)$$

2) Tertuju pada nilai tertentu

Adalah karakteristik kualitas dengan nilai target tidak nol dan terbatas sehingga nilai yang semakin mendekati target tersebut adalah nilai yang



diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n} \right] \quad (2.25)$$

3) Semakin besar semakin baik

Adalah karakteristik kualitas dengan rentang nilai tak terbatas dan non-negatif sehingga nilai yang semakin besar adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{(1/y_i^2)}{n} \right] \quad (2.26)$$

2.5. Logika Fuzzy

Logika *fuzzy* diperkenalkan oleh Prof. Lotfi Zadeh pada tahun 1965, dan merupakan metode yang mempunyai kemampuan untuk memproses Parameter yang bersifat kabur atau yang tidak dapat dideskripsikan secara pasti, misalnya tinggi, lambat, dan bising. Dalam logika *fuzzy*, Parameter-parameter yang bersifat kabur direpresentasikan sebagai sebuah himpunan yang anggotanya adalah suatu nilai *crisp* dan derajat keanggotaannya (*membership function*). Logika *fuzzy* berbeda dengan logika *digital* biasa. Logika *digital* biasa hanya mengenal dua keadaan, yaitu Ya dan Tidak, atau *on* dan *off*, atau *high* dan *low*, atau "1" dan "0", sedangkan logika *fuzzy* meniru cara berpikir manusia dengan menggunakan konsep sifat kesamaran suatu nilai. Dengan teori himpunan *fuzzy*, suatu objek dapat menjadi anggota dari banyak himpunan dengan derajat keanggotaan yang berbeda pada masing-masing himpunan.

Menurut Kusumadewi dan Purnomo (2010), beberapa alasan orang menggunakan logika *fuzzy* antara lain adalah:

1. Konsep logika *fuzzy* mudah dimengerti. Konsep matematis yang mendasari penalaran *fuzzy* sangat sederhana dan mudah dimengerti.
2. Logika *fuzzy* sangat fleksibel.
3. Logika *fuzzy* memiliki toleransi terhadap data-data yang tidak tepat.



4. Logika *fuzzy* mampu memodelkan fungsi-fungsi non-linear yang sangat kompleks.
5. Logika *fuzzy* dapat membangun dan mengaplikasikan pengalaman-pengalaman para pakar secara langsung tanpa harus melalui proses pelatihan.
6. Logika *fuzzy* dapat bekerja sama dengan teknik-teknik kendali secara konvensional.
7. Logika *fuzzy* didasarkan pada bahasa alami.

Beberapa hal yang perlu diketahui dalam memahami sistem *fuzzy* adalah sebagai berikut:

a) Parameter *fuzzy*

Merupakan parameter yang hendak dibahas dalam suatu sistem *fuzzy*, sebagai contoh adalah umur, temperatur, dan permintaan.

b) Himpunan *fuzzy*

Merupakan suatu grup yang mewakili suatu kondisi atau keadaan tertentu dalam suatu parameter *fuzzy*. Sebagai contoh adalah parameter umur yang terbagi menjadi tiga himpunan *fuzzy*, yaitu muda, paruh baya, dan tua. Himpunan *fuzzy* mempunyai dua atribut, yaitu:

- Linguistik

Merupakan penamaan suatu grup yang mewakili suatu keadaan atau kondisi tertentu dengan menggunakan bahasa alami, seperti: muda, paruh baya, dan tua.

- Numeris

Adalah suatu nilai (angka) yang menunjukkan ukuran dari suatu parameter, seperti 4, 25, dan 50.

c) Semesta pembicaraan

Semesta pembicaraan merupakan keseluruhan nilai yang diperbolehkan untuk dioperasikan dalam suatu parameter *fuzzy*. Semesta pembicaraan merupakan himpunan bilangan riil yang senantiasa naik (bertambah) secara monoton dari kiri ke kanan. Nilai semesta pembicaraan dapat berupa bilangan positif maupun negatif. Kemungkinan nilai semesta pembicaraan ini tidak dibatasi batas atasnya, sebagai contoh adalah:



- Semesta pembicaraan untuk parameter umur adalah $[0 +\infty]$.
- Semesta pembicaraan untuk parameter temperatur adalah $[0-40]$.

d) Domain

Domain himpunan *fuzzy* merupakan keseluruhan nilai yang diizinkan dalam semesta pembicaraan dan boleh dioperasikan dalam suatu himpunan *fuzzy*. Seperti halnya dengan semesta pembicaraan, *domain* merupakan himpunan bilangan *real* yang senantiasa naik (bertambah) secara monoton dari kiri ke kanan. Nilai *domain* dapat berupa bilangan positif maupun negatif, sebagai contoh adalah:

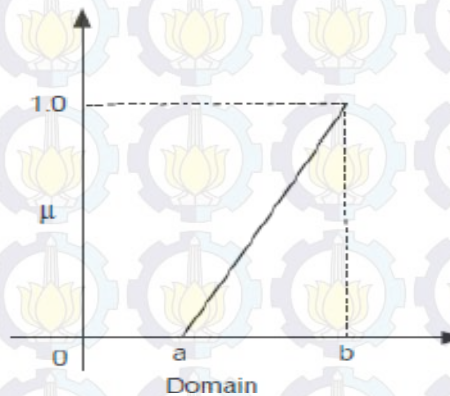
- Muda = $[0, 45]$
- Paruh baya = $[35, 55]$
- Tua = $[45, +\infty]$

2.5.1. Fungsi keanggotaan

Fungsi keanggotaan (*membership function*) adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik input data ke dalam nilai keanggotaannya (sering juga disebut dengan derajat keanggotaan) yang memiliki interval antara 0 sampai 1. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai keanggotaan adalah dengan melalui pendekatan fungsi. Menurut Kusumadewi dan Purnomo (2010), ada beberapa representasi yang dapat digunakan antara lain:

a) Representasi linier naik

Representasi linier naik merupakan kenaikan himpunan dimulai pada nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan 0 dan bergerak ke kanan menuju ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih tinggi, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Representasi linier naik

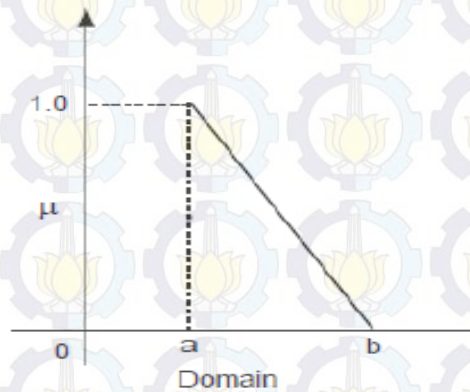
Fungsi keanggotaan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}; & a < x < b \\ 1; & x \geq b \end{cases}$$

b) Representasi linier turun

Representasi linier turun merupakan kebalikan dari representasi linear naik.

Garis lurus dimulai dari nilai domain dengan derajat keanggotaan tertinggi pada sisi kiri kemudian bergerak menurun ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih rendah, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Representasi linier turun

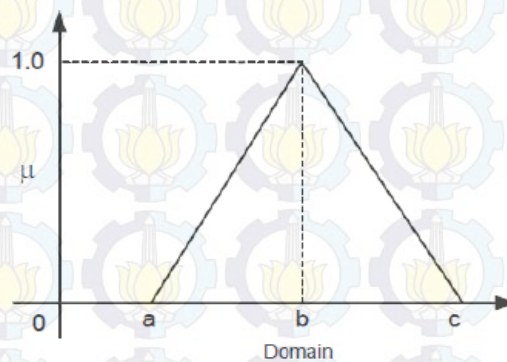
Fungsi keanggotaan dapat dituliskan sebagai berikut:



$$\mu(x) = \begin{cases} 1; & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a}; & a < x < b \\ 0; & x \geq b \end{cases}$$

c) Representasi kurva segitiga

Pada dasarnya kurva segitiga merupakan gabungan antara 2 garis linier, yaitu garis linier naik dan garis linier turun. Ilustrasi dari representasi kurva segitiga ditunjukkan pada Gambar 2.9.



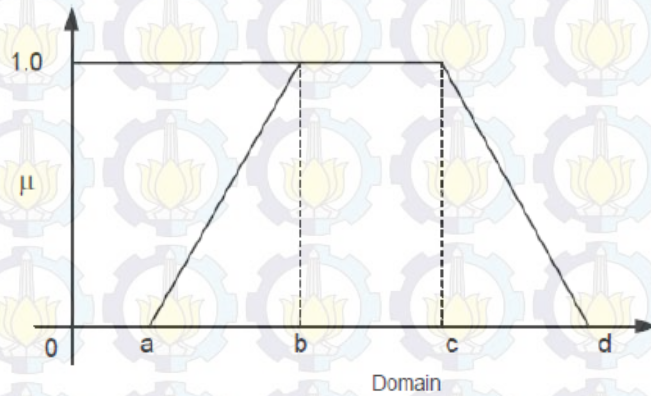
Gambar 2.9 Representasi kurva segitiga

Fungsi keanggotaan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}; & a < x < b \\ \frac{c-x}{c-b}; & b < x < c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

d) Representasi kurva trapesium

Pada dasarnya kurva trapesium seperti bentuk segitiga, hanya saja ada beberapa titik yang memiliki nilai keanggotaan 1. Ilustrasi dari representasi kurva trapesium ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Representasi kurva trapesium

Fungsi keanggotaan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}; & a < x < b \\ 1; & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{c-d}; & c < x < d \\ 0 & x \geq d \end{cases}$$

2.5.2. Fungsi implikasi

Fungsi implikasi pada logika *fuzzy* juga sering disebut sebagai *fuzzy rule*. Tiap-tiap aturan pada basis pengetahuan *fuzzy* akan berhubungan dengan suatu relasi *fuzzy*. Menurut Kusumadewi dan Purnomo (2010), bentuk umum dari aturan yang digunakan dalam fungsi implikasi adalah sebagai berikut:

IF x is A THEN y is B

dengan x dan y adalah skalar, dan A dan B adalah himpunan *fuzzy*. Proposisi yang mengikuti IF disebut sebagai anteseden, sedangkan proposisi yang mengikuti THEN disebut sebagai konsekuen. Proposisi ini dapat diperluas dengan menggunakan operator *fuzzy*, seperti:

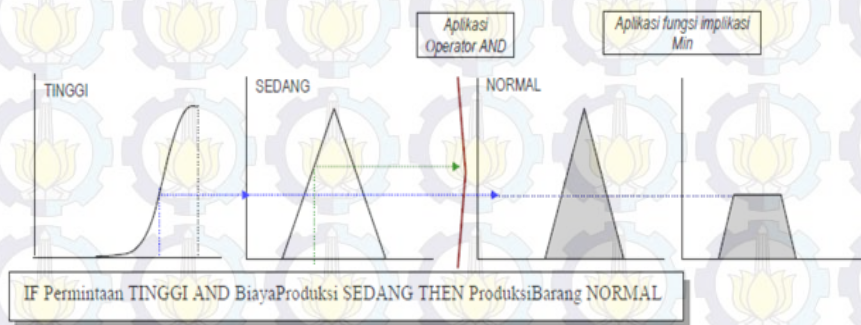
IF $(x_1 \text{ is } A_1) \bullet (x_2 \text{ is } A_2) \bullet (x_3 \text{ is } A_3) \bullet \dots \bullet (x_N \text{ is } A_N)$ THEN y is B
dengan \bullet adalah operator (misal: OR atau AND).

Secara umum ada 2 fungsi implikasi yang dapat digunakan, yaitu:

- a) Min (minimum)



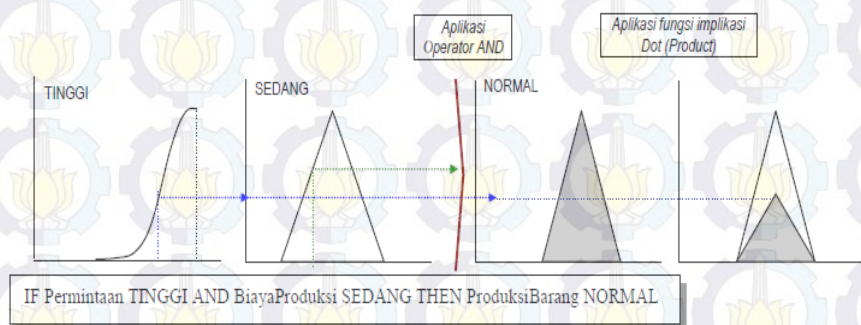
Fungsi minimum akan memotong output himpunan *fuzzy*. salah satu contoh penggunaan fungsi minimum ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Fungsi implikasi: MIN

b) Dot (produk)

Fungsi dot (produk) akan menskala output himpunan *fuzzy*. salah satu contoh penggunaan fungsi dot ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Fungsi implikasi: DOT

2.5.3. Sistem inferensi *fuzzy* metode mamdani

Metode Mamdani sering juga dikenal dengan nama Metode Max-Min. Metode ini diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975. Menurut Kusumadewi dan Purnomo (2010), untuk mendapatkan output diperlukan 4 tahapan adalah sebagai berikut:

1. Pembentukan himpunan *fuzzy*

Pada metode Mamdani, baik parameter input maupun parameter output dibagi menjadi satu atau lebih himpunan *fuzzy*.



2. Aplikasi fungsi implikasi

Pada metode Mamdani, fungsi implikasi yang digunakan adalah Min.

3. Komposisi aturan

Tidak seperti penalaran monoton, apabila sistem terdiri dari beberapa aturan maka inferensi diperoleh dari kumpulan dan korelasi antar aturan.

Ada 3 metode yang digunakan dalam melakukan inferensi sistem fuzzy, yaitu: max, aditif, dan probabilistik OR (probor).

a. Metode MAX (*maximum*)

Pada metode ini, solusi himpunan *fuzzy* diperoleh dengan cara mengambil nilai maksimum aturan kemudian menggunakannya untuk memodifikasi daerah *fuzzy* dan mengaplikasikannya ke output dengan menggunakan operator OR (*union*). Jika semua proposisi telah dievaluasi, maka output akan berisi suatu himpunan *fuzzy* yang merefleksikan kontribusi dari tiap-tiap proposisi. Secara umum fungsi max dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\mu_{sf}[x_i] \leftarrow \max(\mu_{sf}[x_i], \mu_{kf}[x_i])$$

Dengan:

$\mu_{sf}[x_i]$ = nilai keanggotaan solusi *fuzzy* sampai aturan ke-i;

$\mu_{kf}[x_i]$ = nilai keanggotaan konsekuen *fuzzy* aturan ke-i.

Misalkan ada 3 aturan (proposisi), maka penulisannya adalah sebagai berikut:

[R1] IF Biaya Produksi RENDAH And Permintaan NAIK

THEN Produksi Barang BERTAMBAH;

[R2] IF Biaya Produksi STANDAR

THEN Produksi Barang NORMAL;

[R3] IF Biaya Produksi TINGGI And Permintaan TURUN

THEN Produksi Barang BERKURANG.

Proses inferensi dengan menggunakan metode Max dalam melakukan komposisi aturan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.13. Apabila digunakan fungsi implikasi MIN, maka metode komposisi ini sering disebut dengan nama MAX-MIN atau MIN-MAX atau MAMDANI.



b. Metode aditif (*Sum*)

Pada metode ini, solusi himpunan *fuzzy* diperoleh dengan cara melakukan *bounded-sum* terhadap semua output daerah *fuzzy*. Secara umum dituliskan sebagai berikut:

$$\mu_{sf}[x_i] \leftarrow \min(1, \mu_{sf}[x_i] + \mu_{kf}[x_i])$$

dengan:

$\mu_{sf}[x_i]$ = nilai keanggotaan solusi *fuzzy* sampai aturan ke-i;

$\mu_{kf}[x_i]$ = nilai keanggotaan konsekuen *fuzzy* aturan ke-i.

c. Metode probabilistik OR (probor)

Pada metode ini, solusi himpunan *fuzzy* diperoleh dengan cara melakukan produk terhadap semua output daerah *fuzzy*. Secara umum dituliskan sebagai berikut:

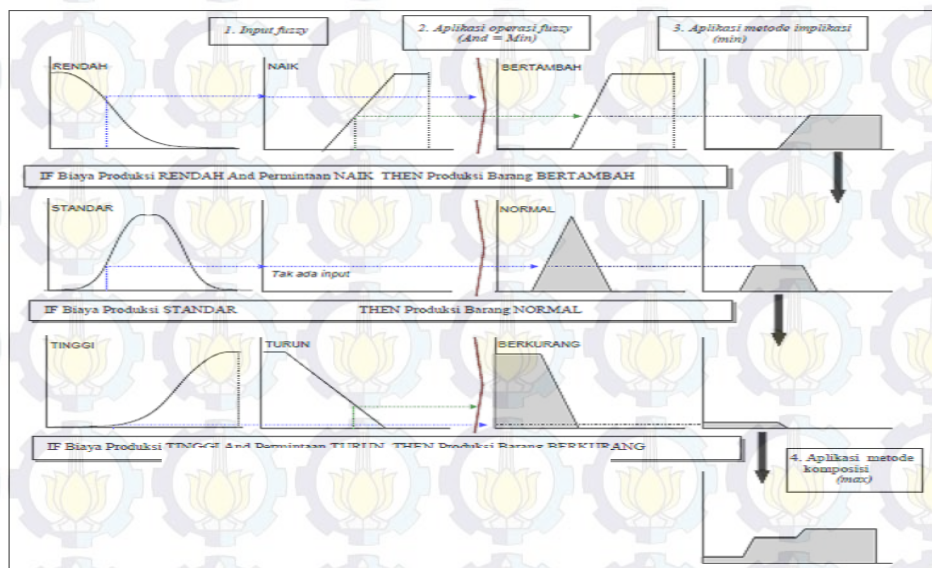
$$\mu_{sf}[x_i] \leftarrow (\mu_{sf}[x_i] + \mu_{kf}[x_i]) - (\mu_{sf}[x_i] * \mu_{kf}[x_i])$$

dengan:

$\mu_{sf}[x_i]$ = nilai keanggotaan solusi *fuzzy* sampai aturan ke-i;

$\mu_{kf}[x_i]$ = nilai keanggotaan konsekuen *fuzzy* aturan ke-i.

Komposisi aturan *fuzzy* metode MAX ditunjukkan pada Gambar 2.13.

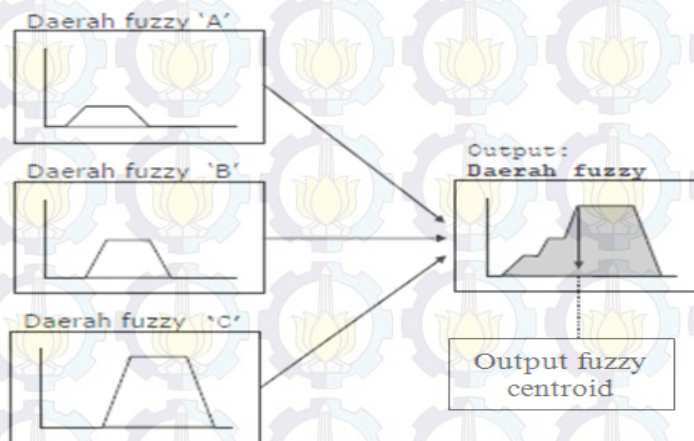


Gambar 2.13 Komposisi aturan *fuzzy* metode MAX



4. Defuzzification

Defuzzification merupakan proses yang digunakan untuk pengubahan nilai hasil fuzzification menjadi FRG dengan cara melakukan pemetaan himpunan fuzzy ke himpunan tegas (*crisp*). Input dari proses defuzzifikasi adalah suatu himpunan fuzzy yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan fuzzy sedangkan output yang dihasilkan merupakan suatu bilangan pada domain himpunan fuzzy tersebut. Apabila diberikan suatu himpunan fuzzy dalam interval tertentu, maka harus dapat diambil suatu nilai *crisp* tertentu sebagai output, ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Proses defuzzifikasi

Ada beberapa metode defuzzifikasi pada komposisi aturan MAMDANI, yaitu:

a. Metode *centroid (composite moment)*

Pada metode ini, *defuzzification* dilakukan dengan cara mengambil titik pusat daerah fuzzy (z^*). Secara umum perumusannya dari Kusumadewi dan Purnomo (2010) adalah sebagai berikut:

$$z^* = \frac{\sum_{j=1}^n z_j \mu(z_j)}{\sum_{j=1}^n \mu(z_j)} \quad (2.27)$$



Dengan:

z_j = nilai domain

$\mu(z_j)$ = nilai keanggotaan

b. Metode bisektor

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai pada domain *fuzzy* yang memiliki nilai keanggotaan separuh dari jumlah total nilai keanggotaan pada daerah *fuzzy*.

c. Metode *mean of maximum* (MOM)

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai rata-rata domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

d. Metode *largest of maximum* (LOM)

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai terbesar dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

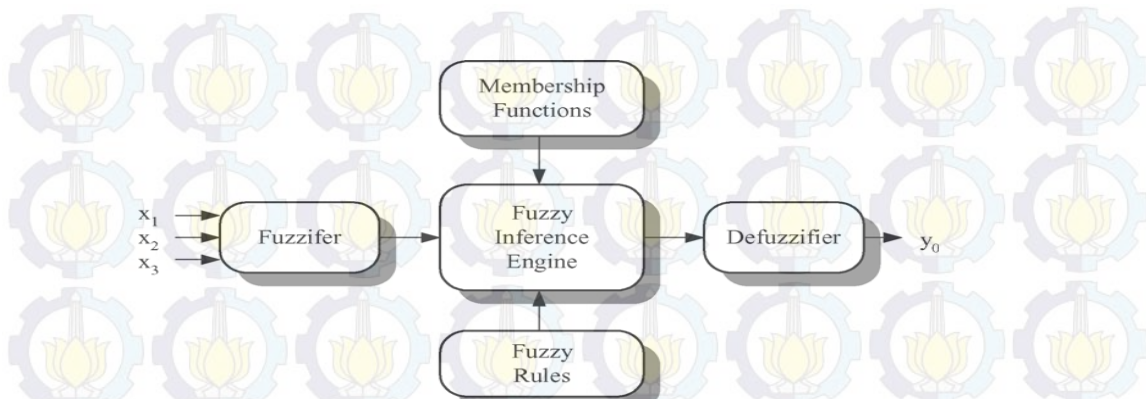
e. Metode *smallest of maximum* (SOM)

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai terkecil dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

2.6. Metode Taguchi dan Logika Fuzzy

Penggunaan metode Taguchi hanya dapat melakukan optimasi untuk satu respon. Digunakan gabungan dari metode Taguchi dan logika *fuzzy* agar dapat melakukan optimasi beberapa respon secara serentak. Logika *fuzzy* diciptakan oleh Dr. Lotfi Zadeh dari Universitas California, 1965. Dr. Zadeh memodifikasi teori himpunan sehingga setiap anggotanya memiliki derajat keanggotaan yang bernilai kontinyu antara nol sampai satu. Himpunan ini disebut dengan himpunan kabur.

Logika *fuzzy* memiliki kemampuan dalam menangkap pertimbangan akal sehat manusia dan pengambilan keputusan serta aspek kognitif manusia yang lainnya. Ketidakjelasan dalam batasan dapat secara alami dimodelkan dengan menggunakan logika *fuzzy* (Dhavamani, 2011). Oleh karena itu, ketidakjelasan dalam memberikan pembobotan dapat diatasi dengan penggunaan logika *fuzzy* dan ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Struktur proses logika *fuzzy* Lin dan Lin (2005)

Lin dan Lin (2005) menyatakan langkah awal pada penggunaan metode logika *fuzzy* adalah proses *fuzzifier* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15. *fuzzifier* merupakan proses yang menggunakan fungsi keanggotaan untuk mengubah nilai awal, yaitu rasio S/N menjadi bilangan *fuzzy*. Alat penarik kesimpulan akan menghasilkan nilai *fuzzy* berdasarkan logika *fuzzy* yang dimasukkan melalui *fuzzy rules*. Pada akhirnya proses *defuzzifier* akan mengubah nilai *fuzzy* menjadi *fuzzy reasoning grade* (FRG). Langkah-langkah untuk proses optimasi dengan metode Taguchi dan logika *fuzzy* adalah sebagai berikut:

1. Perhitungan nilai rasio S/N untuk masing-masing respon.
2. *Fuzzification* (menggunakan fungsi keanggotaan *fuzzy*).
3. Pengaplikasian *fuzzy rules*.
4. *Defuzzification* (menghasilkan FRG)
5. Penentuan kombinasi parameter yang menghasilkan respon optimal.
6. Perhitungan prediksi nilai FRG hasil optimasi.
7. Analisis variansi dan persen kontribusi.
8. Melakukan percobaan konfirmasi.

Adapun rincian dari langkah-langkah tersebut adalah sebagai berikut:

1. Perhitungan nilai rasio S/N untuk masing-masing respon

Rasio S/N (*signal to noise*) digunakan untuk memilih parameter-parameter proses yang memiliki kontribusi pada pengurangan variasi suatu respon. Rasio S/N merupakan rancangan untuk transformasi pengulangan data ke dalam suatu nilai yang merupakan ukuran variasi yang timbul.



2. Tahap *fuzzification*

Fuzzification merupakan proses pengubahan nilai awal, yaitu rasio S/N menjadi bilangan *fuzzy* dengan menggunakan fungsi keanggotaan (*membership function*) bentuk segitiga. Interval nilai keanggotaan yang digunakan disesuaikan dengan nilai rasio S/N yang didapat. Pendekatan fungsi digunakan sebagai salah satu cara untuk mendapatkan nilai keanggotaan. Ada dua fungsi keanggotaan yang umum digunakan dalam penelitian, yaitu fungsi keanggotaan kurva segitiga dan kurva trapesium. Fungsi keanggotaan kurva segitiga ditunjukkan pada Gambar 2.9. Fungsi keanggotaan kurva trapesium ditunjukkan pada Gambar 2.10.

3. Pengaplikasian *fuzzy rules*

Setelah tahap *fuzzification*, langkah berikutnya mengaplikasi *fuzzy rules* untuk mendapatkan nilai *fuzzy*. Pembuatan *fuzzy rules* yang berupa aturan *IF-THEN* (jika-maka) dilakukan dengan menggunakan rasio S/N dari respon-respon sebagai parameter input dan FRG. Dengan demikian, *fuzzy rules* juga merupakan alat penarik kesimpulan dan akan menghasilkan nilai *fuzzy* berdasarkan logika *fuzzy*. Penjelasan lebih lanjut pada sub sub-bab 2.5.2.

4. *Defuzzification*

Defuzzification merupakan proses yang digunakan untuk pengubahan nilai hasil *fuzzification* menjadi FRG dengan cara melakukan pemetaan himpunan *fuzzy* ke himpunan tegas (*crisp*). Metode yang paling sering digunakan pada proses *defuzzification* adalah metode *centroid*. Penjelasan lebih lanjut pada sub sub-bab 2.5.3 point 4.

5. Penentuan kombinasi parameter yang menghasilkan respon optimal.

Secara umum semakin besar nilai FRG, semakin baik pula respon dari proses pada kombinasi parameter tersebut. Penentuan kombinasi parameter terbaik diawali dengan membuat tabel respon dari FRG seperti ditunjukkan pada Tabel 2.5.



Tabel 2.5 Respon FRG

	Level 1	Level 2	Level j
Parameter A	Y_{11}	-	Y_{1j}
Parameter B	Y_{21}	-	Y_{2j}
-			
Parameter i	Y_{i1}	-	Y_{ij}
Max-Min	Q_1		Q_j

Y_{ij} adalah rata-rata nilai FRG yang dikelompokkan berdasarkan parameter i dan level j . Grafik respon tersebut dibuat berdasarkan tabel respon untuk memudahkan pemilihan level dari parameter yang menghasilkan respon yang optimum.

6. Perhitungan prediksi nilai FRG hasil optimal

Nilai prediksi FRG berdasarkan kombinasi level parameter untuk menghasilkan respon yang optimal dapat dirumuskan (Lin dkk., 2000):

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad (2.28)$$

Dengan:

η_m = Nilai rata-rata dari keseluruhan FRG

$\bar{\eta}$ = Rata-rata FRG pada level optimal

q = Jumlah parameter yang mempengaruhi respon secara signifikan

2.7. Analisis Variansi dan Persen Kontribusi

Analisis variansi (ANAVA) digunakan untuk mengetahui parameter proses yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap respon. Pada percobaan ini, analisis variansi dilakukan pada FRG yang merupakan respon yang mewakili keseluruhan respon. *F-test* digunakan untuk menentukan parameter proses yang mempengaruhi FRG secara signifikan (Montgomery, 2009).

1. Persen kontribusi

Persen kontribusi menunjukkan porsi (kekuatan relatif) masing-masing parameter proses terhadap total variansi dari respon-respon yang diamati secara serentak.



Jika persen kontribusi *error* kurang dari lima belas persen, maka tidak ada parameter yang berpengaruh terabaikan tetapi jika persen kontribusi *error* lebih dari lima belas persen mengindikasikan ada parameter yang berpengaruh terabaikan sehingga *error* yang terjadi terlalu besar. Jumlah derajat kebebasan *error* sangat disarankan tidak melebihi dari setengah derajat kebebasan total (Soejanto, 2009). Interpretasi yang dilakukan pada hasil percobaan dengan menggunakan desain percobaan Taguchi adalah sebagai berikut:

$$\rho = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100\% \quad (2.29)$$

$$SS'_A = SS_A - v_A \cdot MS_E \quad (2.30)$$

Dengan:

SS_A = jumlah kuadrat dari parameter yang dihitung persen kontribusinya

SS_T = jumlah kuadrat total

v_A = derajat kebebasan dari parameter yang dihitung persen kontribusinya

MS_E = rata-rata kuadrat dari parameter *error*

2. Interval keyakinan $(1-\alpha)$ 100% untuk hasil optimasi (Ross, 2008):

$$CI_1 = \sqrt{\frac{F_{\alpha;1;v_E} \cdot MS_E}{n_{eff}}} \quad (2.31)$$

$$\hat{\mu}_{prediksi} - CI_1 \leq \hat{\mu}_{prediksi} \leq \hat{\mu}_{prediksi} + CI_1 \quad (2.32)$$

Dengan:

$\hat{\mu}_{prediksi}$ = dugaan rata-rata FRG pada kombinasi optimum

n_{eff} = banyaknya pengamatan efektif (2.33)

$$n_{eff} = \frac{\text{jumlah total eksperimen}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan parameter} - \text{parameter untuk menduga rata-rata}}$$



2.8. Melakukan Percobaan Konfirmasi

Percobaan konfirmasi merupakan percobaan yang dilakukan berdasarkan kombinasi parameter hasil optimasi. Tujuannya adalah untuk mencocokkan hasil prediksi dengan hasil respon secara aktual dan sekaligus membandingkan hasil respon pada kondisi awal dengan hasil respon setelah dilakukan proses optimasi. Percobaan konfirmasi dinyatakan berhasil jika terjadi perbaikan pada hasil respon setelah dilakukan proses optimasi sesuai dengan karakteristik kualitas dari respon tersebut, dan hasil percobaan konfirmasi tidak jauh dari nilai yang diprediksi.

Langkah-langkah dalam percobaan konfirmasi dapat dijabarkan sebagai berikut:

- Melakukan percobaan berdasarkan kombinasi untuk respon optimal.
- Membandingkan rata-rata hasil percobaan konfirmasi dengan rata-rata hasil prediksi.

Percobaan konfirmasi dinyatakan berhasil apabila:

- Rata-rata hasil percobaan konfirmasi mendekati rata-rata hasil prediksi.
- Interval keyakinan dari rata-rata respon percobaan konfirmasi berhimpit atau beririsan dengan interval keyakinan $(1-\alpha)$ 100% dari rata-rata respon hasil optimal.

Interval keyakinan percobaan konfirmasi dapat dihitung dengan menggunakan rumus (Ross, 2008):

$$CI_2 = \sqrt{F_{\alpha;1;\nu_E} \cdot MS_E \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right]} \quad (2.34)$$

$$\hat{\mu}_{konfirmasi} - CI_2 \leq \hat{\mu}_{konfirmasi} \leq \hat{\mu}_{konfirmasi} + CI_2 \quad (2.35)$$

Dengan:

r = jumlah pengulangan dalam percobaan konfirmasi

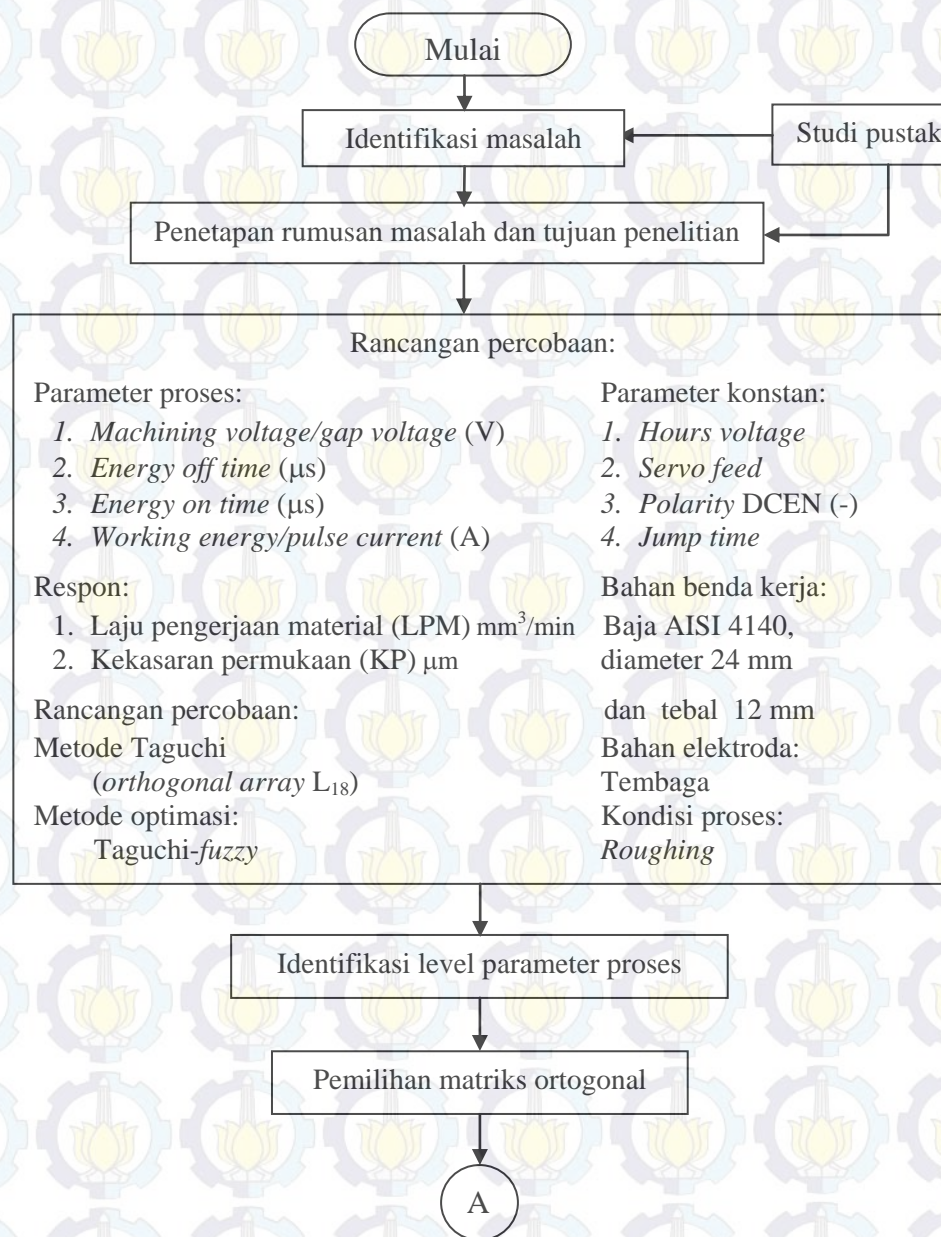


BAB 3

METODA PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah penelitian yang dilakukan pada penelitian ini mengikuti diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 berikut ini:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian



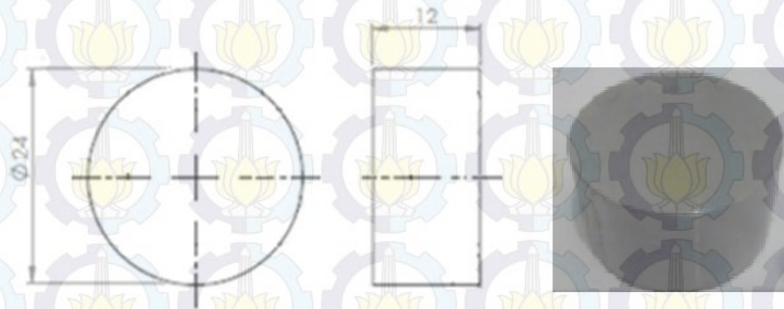
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian (lanjutan)



3.2. Material dan Peralatan Penelitian

3.2.1. Benda kerja

Benda kerja yang digunakan pada penelitian ini terbuat dari baja AISI 4140 dengan ukuran diameter 24 mm dan tebal 12 mm. Ukuran dan bentuk benda kerja tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.2.



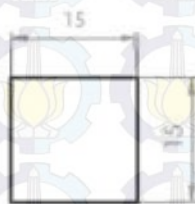
a) Ukuran

b) Bentuk benda kerja

Gambar 3.2 Ukuran dan bentuk benda kerja

2. Elektroda atau pahat

Elektroda yang digunakan pada penelitian ini adalah tembaga dengan ukuran dan bentuk elektroda ditunjukkan pada Gambar 3.3.



b) Ukuran

b) Bentuk elektroda

Gambar 3.3 Ukuran dan bentuk elektroda

Dasar pemilihan elektroda dalam percobaan ini adalah:

1. Rasio keausan yang rendah.
2. Dapat digunakan untuk mengerjakan semua jenis logam.



3.2.2. Peralatan Penelitian

Secara garis besar peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mesin EDM *sinking*

Mesin EDM *sinking* yang digunakan adalah buatan Hitachi dengan spesifikasi sebagai berikut:

- a. Model: H-DS02S.
- b. *Table dimension*: 500 x 300 mm.
- c. *Work tank internal dimensions*: 640 x 400 x 270 mm.
- d. *Servo travel distance*: X-300 x Y-220 x Z-250 mm.

Mesin EDM *sinking* tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Mesin EDM *sinking* (Hitachi H-DS 02 S)

2. *Surface roughness tester*

Surface roughness tester digunakan untuk mengukur KP benda kerja yang dihasilkan dari suatu proses pemesinan. *Surface roughness tester* yang digunakan dalam penelitian ini adalah buatan Mitutoyo tipe SJ 400 yang memiliki kecermatan 0,1 μm dan ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 *Surface roughness tester*

3. Neraca digital

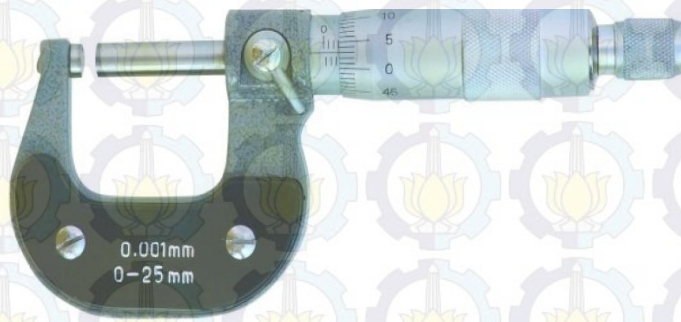
Neraca digital digunakan untuk menimbang massa dari spesimen percobaan sebelum dan sesudah proses pemesinan EDM *sinking*. Neraca digital yang digunakan adalah buatan Ohaus yang memiliki kecermatan 0,01 gram dan ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Neraca digital

4. Mikrometer luar

Mikrometer luar digunakan untuk mengukur dimensi benda kerja dan elektroda sebelum proses pemesinan maupun sesudah proses pemesinan EDM. Mikrometer yang digunakan adalah buatan Mitutoyo yang memiliki kecermatan 0,001 mm dan ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Mikrometer luar

3.3. Parameter Penelitian

Untuk mendapatkan data percobaan pada proses EDM *sinking*, parameter-parameter yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

1. Parameter proses

Parameter proses adalah parameter yang dapat dikendalikan dan nilainya dapat ditentukan. Ada empat parameter proses yang digunakan pada penelitian ini, yaitu:

- a. *Machining voltage* atau *gap voltage*
- b. *Energy off time*
- c. *Energy on time*
- d. *Working energy* atau *pulse current*

2. Respon

Respon merupakan parameter yang diamati secara serentak didalam penelitian. Respon yang digunakan ada dua, yaitu:

- a. Laju pengerjaan material (LPM), mm^3/min .
- b. Kekasaran permukaan (KP), μm .

3. Parameter konstan

Parameter konstan merupakan parameter yang tidak diteliti dalam penelitian. Nilai parameter tersebut dijaga selalu konstan agar tidak berubah selama percobaan. Dengan demikian hasil penelitian tidak berpengaruh secara signifikan. Parameter konstan pada penelitian ini adalah:

- a. *Hours voltage*
- b. *Servo feed*



c. *Polarity* DCEN (-)

d. *Jump time*

4. *Noise*

Noise merupakan parameter gangguan yang memiliki pengaruh terhadap respon, tetapi sangat sulit untuk dikendalikan. Parameter-parameter yang mungkin menjadi *noise* dalam penelitian ini adalah temperatur elektroda, temperatur fluida dielektrik dan temperatur benda kerja selama proses pemesinan EDM *sinking*. Parameter ini tidak dimasukkan ke dalam rancangan percobaan, sehingga pengambilan data dilakukan dengan replikasi untuk mengatasi pengaruh *noise* pada hasil penelitian.

3.4. Rancangan Percobaan

3.4.1. Seting parameter proses pada mesin EDM *sinking*

Penentuan seting parameter proses pada mesin EDM *sinking* dilakukan dengan mengacu pada data manual mesin. Seting parameter yang digunakan dalam percobaan ini adalah parameter proses dan parameter konstan. Seting parameter proses untuk elektroda tembaga yang memiliki dimensi lebar 15 mm dan tebal 15 mm, serta benda kerja baja AISI 4140 yang memiliki diameter 25 mm dan tebal 12 mm dilakukan hanya satu kali untuk seluruh rangkaian penelitian. Seting parameter proses dan level-level parameter tersebut ditunjukkan pada Tabel 3.1 berikut ini:

Tabel 3.1 Seting Parameter Proses dan Level-Level Parameter Proses

Parameter Proses	Satuan	Level 1	Level 2	Level 3
A <i>Machining voltage/gap voltage</i>	Volt	8	10	-
B <i>Energy off time</i>	μ s	21	23	25
C <i>Energy on time</i>	μ s	50	100	150
D <i>Working energy /pulse current</i>	A	15	20	25

Seting mesin untuk parameter konstan yang diteliti dilakukan dengan mempertimbangkan:



1. Nilai masing-masing level parameter masih dalam batas interval yang ditetapkan pada buku pedoman operasional.
2. Nilai pada level tersebut masih dapat digunakan pada proses pemotongan.

Dari data manual yang ada, maka seting mesin untuk parameter konstan yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.2 berikut ini:

Tabel 3.2 Seting parameter konstan

No	Parameter konstan	Nilai
1	Hours voltage	2
2	Servo feed	8
3	Polarity	DCEN (-) / roughing
4	Jump time	1

3.4.2. Pemilihan matriks ortogonal

Matriks ortogonal yang digunakan harus mempunyai derajat kebebasan yang sama atau lebih besar daripada total derajat kebebasan parameter dan level yang telah ditetapkan. Derajat kebebasan parameter proses dan level tersebut dihitung menggunakan persamaan 2.3 dan ditunjukkan pada Tabel 3.3 sebagai berikut:

Tabel 3.3 Total derajat kebebasan parameter dan level

No	Parameter proses	Jumlah level (k)	$v_n = (k-1)$
1	Machining voltage (gap voltage)	2	1
2	Energy off time	3	2
3	Energy on time	3	2
4	Working energy (pulse current)	3	2
Total derajat kebebasan		7	

Tabel 3.3 menunjukkan bahwa total derajat kebebasan parameter dan level yang digunakan adalah tujuh. Hal ini mengakibatkan derajat kebebasan minimum yang harus dimiliki oleh matriks ortogonal yang akan digunakan adalah tujuh. Oleh karena itu, sesuai dengan pilihan yang tersedia, matriks ortogonal L_{18}



($2^1 \times 3^3$) memenuhi syarat untuk dijadikan sebagai rancangan percobaan. Rancangan percobaan matriks ortogonal L_{18} ditunjukkan oleh Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Rancangan percobaan

Percobaan ke-	Parameter proses			
	A	B	C	D
	<i>Machining voltage/gap voltage</i> (V)	<i>Energy off time</i> (μ s)	<i>Energy on time</i> (μ s)	<i>Workingenergy/pulse current</i> (A)
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2

Percobaan dilakukan secara acak dengan kombinasi parameter proses mengacu pada rancangan percobaan yang sesuai dengan matriks ortogonal pada Tabel 3.4. Pengacakan ini dilakukan dengan menggunakan fasilitas randomisasi bilangan melalui bantuan perangkat komputasi statistik. Masing-masing kombinasi parameter proses akan direplikasi sebanyak dua kali untuk mengatasi parameter gangguan (*noise*) yang terjadi selama proses pemotongan berlangsung. Tampilan pelaksanaan percobaan secara acak tersebut ditunjukkan pada Tabel 3.5.



Tabel 3.5 Tampilan data hasil percobaan

Seting Kombinasi ke-	Parameter proses				Respon	
	<i>Machining voltage/gap voltage</i>	<i>Energy off time</i>	<i>Energy on time</i>	<i>Working energy/pulse current</i>	LPM	KP
	(V)	(μ s)	(μ s)	(A)	(mm ³ /menit)	(μ m)
1	8	21	50	15	Y111	Y112
2	8	21	100	20	Y121	Y122
3	8	21	150	25	Y211	Y212
4	8	23	50	15	Y221	Y222
5	8	23	100	20	Y311	Y312
6	8	23	150	25	Y321	Y322
7	8	25	50	20	Y411	Y412
8	8	25	100	25	Y421	Y422
9	8	25	150	15	Y511	Y512
10	10	21	50	25	Y521	Y522
11	10	21	100	15	Y611	Y612
12	10	21	150	20	Y621	Y622
13	10	23	50	20	Y711	Y712
14	10	23	100	25	Y721	Y722
15	10	23	150	15	Y811	Y812
16	10	25	50	25	Y821	Y822
17	10	25	100	15	Y911	Y912
18	10	25	150	20	Y921	Y922

Y_{ijk} adalah data respon untuk kombinasi kombinasi seting parameter ke-i, replikasi ke-j, dan respon ke-k.

3.5. Prosedur Percobaan

Langkah-langkah dari percobaan yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penyiapan benda kerja dan elektroda, meliputi penyesuaian dimensi dan memastikan tidak ada cat atau kotoran pada permukaan benda kerja dan elektroda
2. Penimbangan berat awal benda kerja untuk setiap benda kerja sebelum dilakukan proses pemesinan menggunakan mesin EDM *sinking*.
3. Pemasangan benda kerja. Benda kerja dan meja mesin EDM *sinking* dibersihkan dari minyak, oleh karena dimensi benda kerja yang kecil



sehingga diperlukan ragam untuk mencekam benda kerja sehingga posisi benda kerja tidak berubah.

4. Pemasangan elektroda pada *holder* mesin EDM *sinking*. Untuk memastikan bahwa posisi elektroda tidak miring, maka digunakan *dial indikator*.
5. Penyalaan mesin EDM *sinking* diikuti oleh penyetingan parameter-parameter proses kemudian *inputkan* nilai parameter proses tersebut pada program untuk pengikisan benda kerja sedalam 3 mm.
6. Penentuan titik referensi. Elektroda digerakkan ke arah bawah hingga menyentuh permukaan benda kerja. Alarm akan berbunyi ketika elektroda dan benda kerja bersentuhan, kemudian dilakukan penyetingan sumbu Z dengan nilai nol. Pemindahan elektroda dinaikkan 8 mm keatas permukaan benda kerja dan lakukan pengaturan posisi *nozzle* fluida dielektrik.
7. Pengaliran fluida dielektrik. Fluida dielektrik dialirkan ke tangki sampai menutupi seluruh permukaan benda kerja, kemudian mesin EDM *sinking* dioperasikan.
8. Pencatatan waktu proses pemesinan EDM *sinking* ketika terjadi *spark* yang pertama hingga mesin berhenti. Mesin akan berhenti, jika elektroda sudah bergerak kebawah sejauh 3 mm terhadap titik referensi.
9. Penghentian proses pemesinan dengan menunggu fluida dielektrik yang ada didalam bak penampung habis.
10. Pelepasan benda kerja dari alat pencekaman dan disertai oleh pelepasan elektroda dari *holder* mesin EDM *sinking*.
11. Pengeringan benda kerja dan elektroda dari fluida dielektrik.
12. Penimbangan berat akhir setiap benda kerja dilakukan setelah proses pemesinan menggunakan mesin EDM *sinking*.

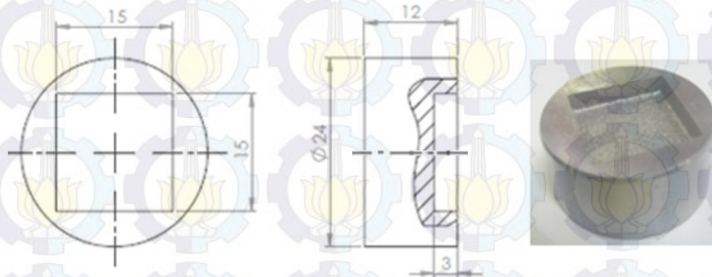
3.6. Pengukuran dan Pengambilan Data

1. Pengambilan data LPM

LPM benda kerja merupakan pengurangan volumetrik persatuan waktu. Nilai pengurangan volumetrik diperoleh dari selisih antara berat benda kerja sebelum dan sesudah proses pemesinan EDM *sinking*. Penimbangan berat sebelum dan sesudah proses pemesinan EDM pada benda kerja dilakukan



dengan menggunakan neraca digital. Bentuk benda kerja yang telah diproses dengan menggunakan mesin EDM *sinking* ditunjukkan pada Gambar 3.8.

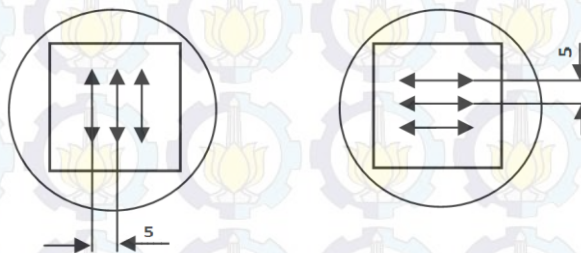


Gambar 3.8 Bentuk benda kerja hasil pemesian EDM *sinking*

2. Pengambilan data KP

Data KP benda kerja didapat dari pengukuran pada permukaan benda kerja secara langsung. Langkah-langkah dari pengukuran KP adalah sebagai berikut:

- Benda kerja hasil pemesian EDM *sinking* diletakkan pada meja rata, dimana *surface roughness tester* juga diletakkan pada meja rata tersebut.
- Ujung sensor dari *surface roughness tester* disentuhkan pada permukaan benda kerja hasil proses pemesian EDM *sinking*.
- Surface roughness tester* diaktifkan untuk melakukan proses pengukuran KP sepanjang 2,5 mm.
- Nilai KP dapat dilihat pada layar *display surface roughness tester*.
- Benda kerja yang telah diukur KP nya dibebaskan dari ujung sensor *surface roughness tester*, selanjutnya *surface roughness tester* digeser sejauh 5 mm untuk mengukur nilai KP pada titik yang lainnya seperti ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Skema proses pengukuran KP benda kerja.



BAB 4

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengambilan Data Hasil Percobaan

Pengambilan data penelitian dilakukan dengan cara mengkombinasikan parameter-parameter proses yang terdapat pada mesin EDM *sinking* Hitachi H-DS 02 S. Adapun parameter-parameter proses yang diduga berpengaruh terhadap respon LPM dan KP adalah *machining voltage* atau *gap voltage* (A), *energy off time* (B), *energy on time* (C), *working energy* atau *pulse current* (D).

Pelaksanaan pengambilan data pada penelitian ini dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Penimbangan berat awal benda kerja.

Proses ini dilakukan dengan cara menimbang setiap benda kerja sebelum dilakukan pemesinan dengan proses EDM *sinking*. Pengambilan data tersebut dilakukan dengan dua kali replikasi. Berat awal benda kerja merupakan rata-rata dari dua replikasi tersebut dan dapat dilihat pada Lampiran A.

2. Pencatatan waktu pemesinan dengan proses EDM *sinking* untuk setiap benda kerja dapat dilihat pada lampiran B.

3. Penimbangan berat akhir benda kerja.

Proses ini dilakukan dengan cara menimbang setiap benda kerja setelah dilakukan pemesinan dengan proses EDM *sinking*. Pengambilan data tersebut dilakukan dengan dua kali replikasi. Berat akhir benda kerja merupakan rata-rata dari dua replikasi tersebut dan dapat dilihat pada Lampiran C.

4. Perhitungan LPM.

Proses ini dilakukan dengan cara mengolah data berat awal, data berat akhir benda kerja dan data waktu proses EDM *sinking* untuk setiap benda kerja. Perhitungan LPM dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.1 atau dengan menggunakan langkah-langkah sebagai berikut:



a. Perhitungan selisih berat benda kerja.

Selisih berat benda kerja atau berat yang terbangun merupakan berat awal benda kerja dikurangi berat akhir benda kerja. Contoh perhitungan selisih berat benda kerja pertama adalah sebagai berikut:

$$\Delta W = W_i - W_f$$

$$\Delta W = 45,20 - 40,27 = 4,93$$

Dengan:

W_i = Berat awal benda kerja (gram)

W_f = Berat akhir benda kerja (gram)

ΔW = Selisih berat benda kerja (gram)

Dengan demikian selisih berat benda kerja adalah sebesar 4,93 gram.

b. Perhitungan volume benda yang terbangun.

Volume benda yang terbangun merupakan selisih berat benda yang terbangun dibagi berat jenis benda kerja. Contoh perhitungan volume benda yang terbangun untuk benda kerja pertama adalah sebagai berikut:

$$V = \frac{\Delta W}{\rho}$$

$$V = \frac{4,93}{0,00785} = 628,025$$

Dengan:

ρ = Berat jenis benda kerja AISI 4140 (0,00785 gr/mm³)

V = Volume benda kerja yang terbangun (mm³)

Dengan demikian volume benda kerja yang terbangun adalah sebesar 628,025 mm³.

c. LPM.

LPM merupakan volume benda yang terbangun dibagi waktu pengerjaan benda kerja. Contoh perhitungan LPM untuk benda kerja pertama adalah sebagai berikut:

$$LPM = \frac{V}{t} \quad (\text{mm}^3/\text{menit}).$$

$$LPM = \frac{628,025}{64,5} = 9,736$$



Dengan:

t = waktu pengerjaan (menit)

Dengan demikian LPM untuk benda kerja pertama adalah sebesar 9,736 mm³/menit. Perhitungan LPM selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran E.

5. Pengukuran KP benda kerja.

Pengukuran KP benda kerja dilakukan dengan menggunakan alat ukur *surface roughness tester* dan hasilnya ditunjukkan pada lampiran D. Data hasil percobaan secara keseluruhan ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data hasil percobaan

Seting Kombina si ke-	Parameter proses				Respon	
	A	B	C	D	LPM	KP
	<i>Machining voltage/ gap voltage (V)</i>	<i>Energy off time (μs)</i>	<i>Energy on time (μs)</i>	<i>Working energy/ pulse current (A)</i>	<i>(mm³/min)</i>	<i>(μm)</i>
1	1	1	1	1	9,735	4,875
2	1	1	2	2	17,878	6,555
3	1	1	3	3	25,278	7,465
4	1	2	1	1	13,739	6,37
5	1	2	2	2	18,919	7,74
6	1	2	3	3	28,540	9,09
7	1	3	1	2	19,986	7,805
8	1	3	2	3	26,250	7,52
9	1	3	3	1	13,374	7,87
10	2	1	1	3	24,069	4,92
11	2	1	2	1	15,780	5,01
12	2	1	3	2	20,950	6,445
13	2	2	1	2	23,098	6,145
14	2	2	2	3	29,514	7,775
15	2	2	3	1	15,182	7,01
16	2	3	1	3	27,682	6,535
17	2	3	2	1	13,398	5,865
18	2	3	3	2	23,362	10,905

Sumber: Hasil perhitungan dan pengukuran

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan kondisi pemotongan kasar (*roughing*). Berdasarkan Tabel 2.2 menunjukkan bahwa hasil percobaan awal tersebut rata-rata KP dengan menggunakan seting kombinasi awal pada percobaan



kombinasi ke-5 adalah sebesar 7,74 μm . Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa nilai yang dihasilkan KP berada pada interval kondisi pemotongan kasar (*roughing*).

4.2. Perhitungan Rasio S/N dari Respon

Rasio S/N merupakan rancangan yang digunakan untuk melakukan transformasi pengulangan data ke dalam suatu nilai ukuran variasi yang timbul. Nilai rasio S/N tergantung pada jenis karakteristik kualitas dari masing-masing respon. Perhitungan nilai rasio S/N pada penelitian ini dilakukan dengan cara sebagai berikut:

1. Untuk respon LPM yang memiliki karakteristik kualitas semakin besar semakin baik (*larger is better*), digunakan persamaan 2.26.
2. Untuk respon KP yang memiliki karakteristik kualitas semakin kecil semakin baik (*smaller is better*), digunakan persamaan 2.24.

Contoh perhitungan rasio S/N dari LPM untuk setiap kombinasi pertama adalah sebagai berikut:

$$S/N = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1/y_i^2)$$

$$S/N = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}$$

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{10,055^2} + \frac{1}{9,414^2} \right)$$

$$S/N = -10 \log 0,010587$$

$$S/N = 19,75221$$

Nilai rasio S/N yang diperoleh untuk masing-masing respon yang diamati ditunjukkan pada Tabel 4.2 sebagai berikut:



Tabel 4.2 Rasio S/N untuk masing-masing respon

Seting Kombinasi ke-	Parameter Proses				Rasio S/N Respon	
	A	B	C	D	LPM	KP
	<i>Machining voltage/gap voltage</i> (V)	<i>Energy off time</i> (ms)	<i>Energy on time</i> (ms)	<i>Working energy/pulse current</i> (A)		
1	1	1	1	1	19,752	-13,760
2	1	1	2	2	25,039	-16,331
3	1	1	3	3	28,022	-17,484
4	1	2	1	1	22,728	-16,147
5	1	2	2	2	25,519	-17,795
6	1	2	3	3	29,077	-19,171
7	1	3	1	2	25,975	-17,850
8	1	3	2	3	28,332	-17,525
9	1	3	3	1	22,524	-17,949
10	2	1	1	3	27,626	-13,846
11	2	1	2	1	23,626	-14,031
12	2	1	3	2	26,304	-16,189
13	2	2	1	2	27,269	-15,876
14	2	2	2	3	29,212	-17,779
15	2	2	3	1	23,603	-16,927
16	2	3	1	3	28,841	-16,320
17	2	3	2	1	22,472	-15,372
18	2	3	3	2	27,167	-20,771

Sumber: Hasil perhitungan

4.3. Fuzzification

Nilai rasio S/N tersebut akan dimasukkan ke dalam sistem logika *fuzzy* dan diubah ke dalam *linguistic fuzzy subsets* dengan menggunakan fungsi keanggotaan bentuk segitiga. Secara uniform fungsi keanggotaan didefinisikan menjadi 3 *fuzzy subsets*, yaitu *small* (S), *medium* (M) dan *large* (L).

Fungsi keanggotaan berdasarkan bentuk kurva segitiga untuk rasio S/N respon LPM adalah sebagai berikut:



$$m_{small}(x) = \begin{cases} 1; & x \leq 19,752 \\ \frac{24,482 - x}{24,482 - 19,652}; & 19,752 < x < 24,482 \\ 0; & x \geq 24,482 \end{cases}$$

$$\mu_{medium}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 19,752 \\ \frac{x - 19,752}{24,482 - 19,752}; & 19,752 < x < 24,482 \\ \frac{29,212 - x}{29,212 - 24,482}; & 24,482 < x < 29,212 \\ 1; & x \geq 29,212 \end{cases}$$

$$m_{arge}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 24,482 \\ \frac{x - 24,482}{29,212 - 24,482}; & 24,482 < x < 29,212 \\ 1; & x \geq 29,212 \end{cases}$$

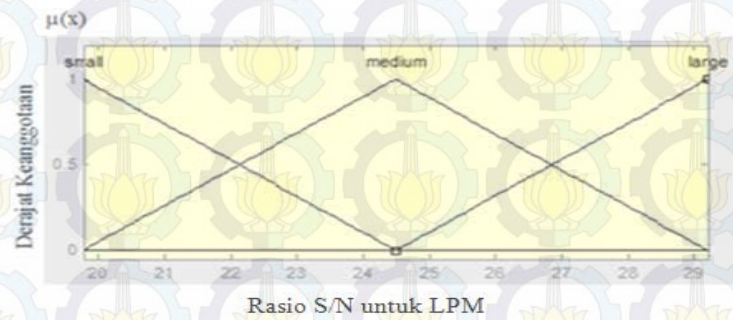
Fungsi keanggotaan berdasarkan bentuk kurva segitiga untuk rasio S/N respon KP adalah sebagai berikut:

$$m_{small}(x) = \begin{cases} 1; & x \leq -20,771 \\ \frac{-17,265 - x}{-17,265 - (-20,771)}; & -20,771 < x < -17,265 \\ 0; & x \geq -17,265 \end{cases}$$

$$\mu_{medium}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq -20,771 \\ \frac{x - (-20,771)}{-17,265 - (-20,771)}; & -20,771 < x < -17,265 \\ \frac{-13,760 - x}{-13,760 - (-17,265)}; & -17,265 < x < -13,760 \\ 1; & x \geq -13,760 \end{cases}$$

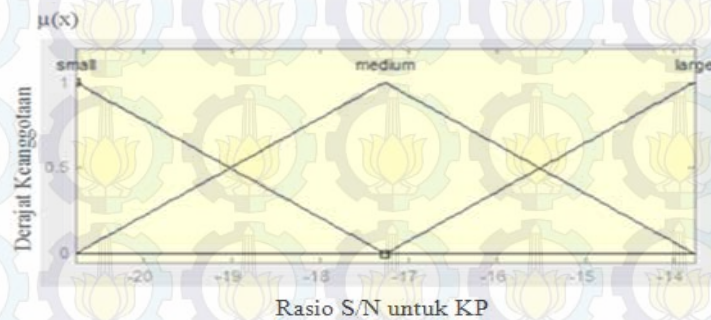
$$m_{arge}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq -17,265 \\ \frac{x - (-17,265)}{-13,760 - (-17,265)}; & -17,265 < x < -13,760 \\ 1; & x \geq -13,760 \end{cases}$$

Ilustrasi dari fungsi keanggotaan untuk respon LPM ditunjukkan pada Gambar 4.1.



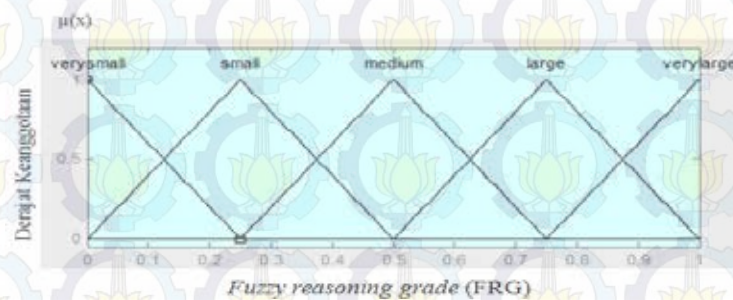
Gambar 4.1 Fungsi keanggotaan untuk LPM

Ilustrasi dari fungsi keanggotaan untuk respon KP ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Fungsi keanggotaan untuk KP

Parameter *output* dari sistem logika *fuzzy* pada penelitian ini adalah *fuzzy reasoning grade* (FRG) yang diubah ke dalam *linguistic fuzzy subsets*, dengan menggunakan fungsi keanggotaan yang berbentuk segitiga. Fungsi keanggotaan untuk parameter *output* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 kemudian didefinisikan menjadi 5 *fuzzy subsets*, yaitu *very small* (VS), *small* (S), *medium* (M), *large* (L) dan *very large* (VL).



Gambar 4.3 Fungsi keanggotaan multirespon FRG



4.4. Pengaplikasian *Fuzzy Rules*

Pembuatan *fuzzy rules* yang berupa aturan *if-then* (jika-maka) dilakukan dengan menggunakan rasio S/N dari respon-respon sebagai parameter *input* dan FRG sebagai parameter *output*. Penelitian ini menggunakan 2 parameter *input* yang masing-masing memiliki 3 *fuzzy subsets*, sehingga diperlukan 9 *fuzzy rules* untuk mengkombinasikan seluruh *input*. Parameter *output* yang mewakili respon pada penelitian ini memiliki 5 *fuzzy subsets*. Tabel 4.3 menunjukkan keseluruhan *fuzzy rules* yang digunakan pada penelitian ini.

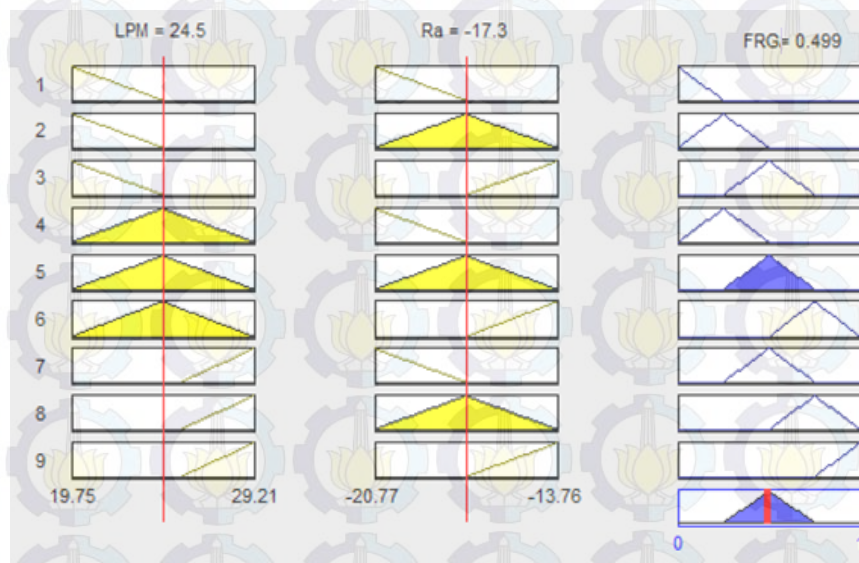
Tabel 4.3 *Fuzzy rules*

Respon		KP		
		<i>Small</i>	<i>Medium</i>	<i>Large</i>
LPM	<i>Small</i>	<i>Very Small</i>	<i>Small</i>	<i>Medium</i>
	<i>Medium</i>	<i>Small</i>	<i>Medium</i>	<i>Large</i>
	<i>Large</i>	<i>Medium</i>	<i>Large</i>	<i>Very Large</i>

Sebagai contoh untuk pembacaan Tabel 4.3 diatas adalah jika LPM *small* (S) dan KP *small* (S) maka FRG adalah *very small* (VS). Jika LPM *small* (S) dan KP *medium* (M), maka FRG adalah *small* (S).

4.5. *Defuzzification*

Defuzzification (penegasan) merupakan suatu proses pemetaan himpunan *fuzzy* ke himpunan tegas (*crisp*). Nilai rasio S/N masing-masing respon digunakan sebagai input dari proses *defuzzification*, yaitu suatu himpunan *fuzzy* yang diperoleh dari komposisi *fuzzy rules*. *Output* yang dihasilkan adalah FRG yang berupa suatu bilangan pada domain himpunan *fuzzy* tersebut. Proses *defuzzification* dilakukan dengan menggunakan metode *centroid* (titik tengah). Ilustrasi aturan *fuzzy* untuk proses penegasan ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Ilustrasi aturan *fuzzy* untuk proses *defuzzification*

Hasil proses *defuzzification* yang berupa nilai FRG yang mewakili respon LPM dan KP secara serentak ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 *Fuzzy reasoning grade* (FRG)

Seting Kombinasi Parameter ke-	FRG
1	0,5002
2	0,5792
3	0,6496
4	0,4903
5	0,5167
6	0,6056
7	0,5336
8	0,6589
9	0,3854
10	0,7957
11	0,6592
12	0,6174
13	0,6643
14	0,7032
15	0,4753
16	0,732
17	0,5175
18	0,3887

Sumber: Hasil perhitungan



4.6. Penentuan Kombinasi Parameter untuk Respon Optimal

Penentuan kombinasi parameter yang menghasilkan respon optimal diawali dengan membuat tabel parameter proses dari FRG. Perhitungan nilai FRG pada masing-masing level dari parameter proses ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Rata-rata FRG pada masing-masing level parameter proses

Simbol Parameter	Parameter proses	FRG		
		Level 1	Level 2	Level 3
A	<i>Machining voltage /gap voltage</i>	0,5466	0,6170	-
B	<i>Energy off time</i>	0,6336	0,5759	0,5360
C	<i>Energy on time</i>	0,6193	0,6058	0,5203
D	<i>Working energy /pulse current</i>	0,5046	0,5500	0,6908
Total nilai rata-rata FRG = 0,5818				

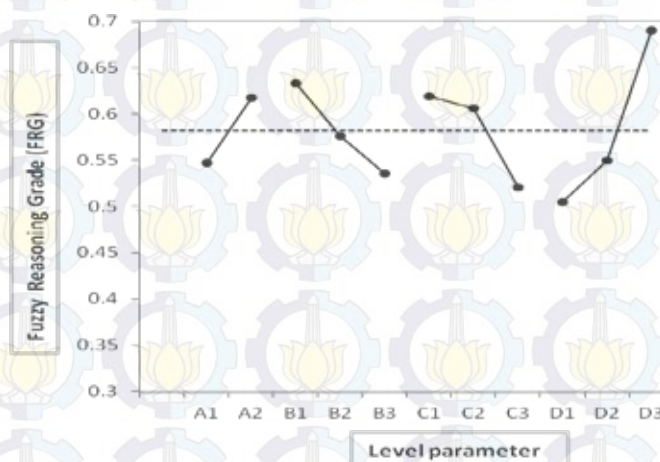
Sumber: Hasil perhitungan

Contoh perhitungan nilai FRG untuk parameter B (*energy off time*) pada level 1 adalah sebagai berikut:

$$\bar{h}n = \frac{0,5002 + 0,5792 + 0,6496 + 0,7957 + 0,6592 + 0,6174}{6}$$

$$\bar{h}n = 0,6335$$

Plot untuk nilai FRG pada masing-masing level dari parameter-parameter proses, yaitu parameter A (*machining voltage* atau *gap voltage*), parameter B (*energy off time*), parameter C (*energy on time*) dan parameter D (*working energy* atau *pulse current*), ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Plotting nilai FRG pada masing-masing level parameter proses



Berdasarkan rata-rata FRG dan *plotting* nilai FRG pada masing-masing level parameter proses, maka dapat ditentukan nilai level untuk kombinasi parameter-parameter proses yang menghasilkan respon optimal. Kombinasi parameter-parameter proses untuk respon optimal tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Kombinasi parameter proses untuk respon optimal

Simbol	Parameter proses	Tingkatan Level	Nilai Level
A	<i>Machining voltage (gap voltage)</i>	Level 2	10 V
B	<i>Energy off time</i>	Level 1	21 ms
C	<i>Energy on time</i>	Level 1	50 ms
D	<i>Working energy (pulse current)</i>	Level 3	25 A

Sumber: Hasil perhitungan

4.7. Hasil Prediksi Nilai FRG dan Interval Keyakinan

Berdasarkan kombinasi parameter untuk respon yang optimal seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.6 dapat ditentukan prediksi dari nilai FRG optimal. Perhitungan prediksi nilai FRG yang optimal dilakukan berdasarkan rata-rata FRG dari masing-masing level parameter yang ditunjukkan pada Tabel 4.5. Nilai prediksi FRG tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan 2.28 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\hat{h} &= h_m + \sum_{i=1}^q (\bar{h}_i - h_m) \\ \hat{h} &= 0,5818 + (0,6170 - 0,5818) + (0,6336 - 0,5818) + (0,6193 - 0,5818) + (0,6908 - 0,5818) \\ \hat{h} &= 0,8153\end{aligned}$$

Dengan demikian nilai FRG prediksi untuk kombinasi parameter yang menghasilkan respon optimal adalah 0,8153.

Penentuan interval keyakinan rata-rata FRG prediksi dilakukan dengan terlebih dahulu menghitung banyaknya pengamatan efektif. Banyaknya pengamatan efektif dihitung dengan menggunakan persamaan 2.33 sebagai berikut:

$$n_{\text{eff}} = \frac{\text{jumlah total eksperimen}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan parameter} - \text{parameter untuk menduga rata-rata}}$$



$$n_{\text{eff}} = \frac{18 \cdot 2}{1 + (1 + 2 + 2 + 2)}$$

$$n_{\text{eff}} = 4,5$$

$$\text{Nilai } F_{(0,025;1;10)} = 6,94 \text{ dan } MS_E = 0,002229$$

Perhitungan interval keyakinan rata-rata FRG hasil optimasi dengan menggunakan persamaan 2.31 adalah sebagai berikut:

$$CI_{\text{optimasi}} = \sqrt{\frac{F_{\alpha;1;u_E} \cdot MS_E}{n_{\text{eff}}}}$$

$$CI_{\text{optimasi}} = \sqrt{\frac{6,94 \cdot 0,002229}{4,5}}$$

$$CI_{\text{optimasi}} = \pm 0,0586$$

Dengan demikian interval keyakinan 97,5% rata-rata FRG hasil optimasi adalah $0,8153 \pm 0,0586$ atau $0,7567 \leq FRG_{\text{prediksi}} \leq 0,8739$.

4.8. Analisis Variansi dan Persen Kontribusi

Analisis variansi (ANOVA) digunakan untuk mengetahui parameter proses yang memiliki kontribusi dalam mengurangi variasi respon LPM dan KP benda kerja secara serentak. Pada penelitian ini, ANOVA dilakukan pada FRG yang merupakan respon yang mewakili keseluruhan respon.

Perhitungan jumlah kuadrat total pada analisis variansi FRG dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.12 yang dijabarkan sebagai berikut:

$$SS_T = \sum_{i=1}^N (Y_i - T)^2$$

$$\begin{aligned} SS_T = & (0,5002-0,5818)^2 + (0,5792-0,5818)^2 + (0,6496-0,5818)^2 + \\ & (0,4903-0,5818)^2 + (0,5167-0,5818)^2 + (0,6056-0,5818)^2 + \\ & (0,5336-0,5818)^2 + (0,6589-0,5818)^2 + (0,3854-0,5818)^2 + \\ & (0,7957-0,5818)^2 + (0,6592-0,5818)^2 + (0,6174-0,5818)^2 + \\ & (0,6643-0,5818)^2 + (0,7032-0,5818)^2 + (0,4753-0,5818)^2 + \\ & (0,7320-0,5818)^2 + (0,5157-0,5818)^2 + (0,3887-0,5818)^2 \end{aligned}$$

$$SS_T = 0,2213941$$



Contoh perhitungan jumlah kuadrat total parameter A (*machining voltage* atau *gap voltage*) dengan menggunakan persamaan 2.13 adalah sebagai berikut:

$$SS_A = [(0,5466 - 0,5818)^2 + (0,6170 - 0,5818)^2] \times 9$$
$$SS_A = 0,022303$$

Contoh perhitungan rata-rata kuadrat untuk parameter A (*machining voltage* atau *gap voltage*) dengan menggunakan persamaan 2.16 adalah sebagai berikut:

$$MS_A = \frac{SS_A}{uA}$$

$$MS_A = \frac{0,022303}{1}$$

$$MS_A = 0,022303$$

Berdasarkan perhitungan, ANAVA untuk FRG ditunjukkan pada Tabel 4.7 berikut ini:

Tabel 4.7 Hasil ANAVA

Sumber variasi	Db	SS	MS	F _{hitung}	P	Kontribusi (%)
A	1	0,02232	0,022317	10,01	0,01	9,04
B	2	0,02885	0,014427	6,47	0,016	10,98
C	2	0,03458	0,017290	7,76	0,009	13,56
D	2	0,11312	0,056558	25,37	0,000	48,91
Error	10	0,02229	0,002229			17,51
Total	17	0,22216				100

Sumber: Hasil perhitungan

Nilai F_{hitung} yang lebih besar daripada F_{tabel} mengindikasikan bahwa parameter proses tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap FRG secara serentak. Hipotesis nol dan hipotesis alternatif yang digunakan pada uji hipotesis dengan menggunakan distribusi F adalah sebagai berikut:

1. Parameter A (*machining voltage* atau *gap voltage*)

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = 0$$

H_1 : paling sedikit ada satu τ tidak sama dengan 0



Kesimpulan: $F_{hitung} = 10,01 > F_{(0,05;1;10)} = 4,96$, maka H_0 ditolak, artinya ada pengaruh parameter *machining voltage* atau *gap voltage* terhadap FRG secara serentak.

2. Parameter B (*energy off time*).

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

H_1 : paling sedikit ada satu β tidak sama dengan 0

Kesimpulan: $F_{hitung} = 6,47 > F_{(0,05;2;10)} = 4,10$, maka H_0 ditolak, artinya ada pengaruh parameter *energy off time* terhadap FRG secara serentak.

3. Parameter C (*energy on time*).

$$H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0$$

H_1 : paling sedikit ada satu γ tidak sama dengan 0

Kesimpulan: $F_{hitung} = 7,76 > F_{(0,05;2;10)} = 4,10$, maka H_0 ditolak, artinya ada pengaruh parameter *energy on time* terhadap FRG secara serentak.

4. Parameter D (*working energy* atau *pulse current*).

$$H_0: \delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 0$$

H_1 : paling sedikit ada satu δ tidak sama dengan 0

Kesimpulan: $F_{hitung} = 25,37 > F_{(0,05;2;10)} = 4,10$, maka H_0 ditolak, artinya ada pengaruh *working energy* atau *pulse current* terhadap FRG secara serentak.

Kondisi hipotesis nol (H_0) untuk masing-masing parameter proses ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Kondisi hipotesis nol respon secara serentak

Sumber Variasi	Kondisi H_0
A	ditolak
B	ditolak
C	ditolak
D	ditolak

Parameter-parameter yang berpengaruh secara signifikan terhadap respon FRG secara serentak adalah parameter A (*machining voltage* atau *gap voltage*), parameter B (*energy off time*), parameter C (*energy on time*) dan parameter D (*working energy* atau *pulse current*). Error yang besar kontribusinya lebih dari



lima belas persen mengindikasikan adanya parameter yang berpengaruh tetapi terabaikan.

Perhitungan persen kontribusi berdasarkan hasil analisis variansi dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.29 dan 2.30. Contoh perhitungan persen kontribusi untuk parameter D (*working energy* atau *pulse current*) adalah sebagai berikut:

$$SS'_D = SS_D - db_D \cdot MS_E$$

$$SS'_D = 0,11312 - 2 \times 0,002229$$

$$SS'_D = 0,108662$$

Dengan demikian:

$$\rho_D = \frac{SS'_D}{SS_T} \cdot 100\%$$

$$\rho_D = \frac{0,108662}{0,22216} \cdot 100\%$$

$$\rho_D = 48,91\%$$

Tabel 4.7 menunjukkan bahwa parameter-parameter proses *machining voltage* atau *gap voltage* (A), *energy off time* (B), *energy on time* (C) dan *working energy* atau *pulse current* (D) mempengaruhi FRG. Parameter-parameter proses yang memiliki kontribusi terhadap total variansi dari FRG adalah *machining voltage* atau *gap voltage* memiliki persen kontribusi yang kecil, yaitu sebesar 9,04%, diikuti berturut-turut oleh *energy off time* memiliki persen kontribusi sebesar 10,98% dan *energy on time* memiliki persen kontribusi sebesar 13,56%. *Working energy* atau *pulse current* memiliki persen kontribusi yang besar, yaitu sebesar 48,91%.

4.9. Uji Asumsi Residual

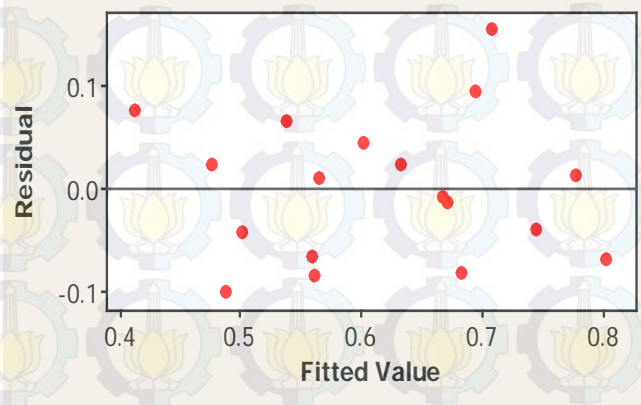
Pemeriksaan terhadap asumsi residual harus dilakukan dalam setiap pendugaan model, untuk mengetahui apakah residual bersifat identik, independen dan berdistribusi normal dengan rata-rata sama dengan nol dan variansi tertentu. Kondisi ini ditulis sebagai $e_i \sim IIDN(0, s^2)$.



Dengan demikian pengujian yang dilakukan terhadap residual adalah sebagai berikut:

a. Uji identik

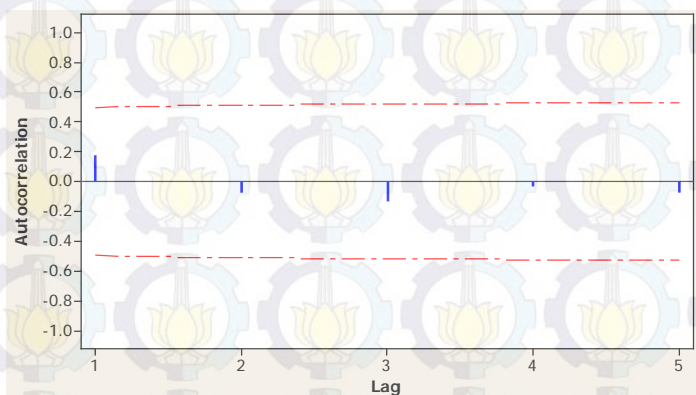
Gambar 4.6 menunjukkan bahwa residual tersebar secara acak disekitar harga nol dan tidak membentuk pola tertentu. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa asumsi residual identik telah terpenuhi.



Gambar 4.6 *Plotting residual versus fitted values*

b. Uji independen

Pengamatan pada penelitian ini dilakukan secara independen dan tidak terdapat korelasi antar pengamatan. Hal ini dibuktikan dari *plotting autocorrelation function* (ACF) pada Gambar 4.7 yang menunjukkan bahwa semua korelasi masih berada pada interval $\pm \frac{2}{\sqrt{n}}$



Gambar 4.7 *Plotting autocorrelation function (ACF)*



c. Uji kenormalan

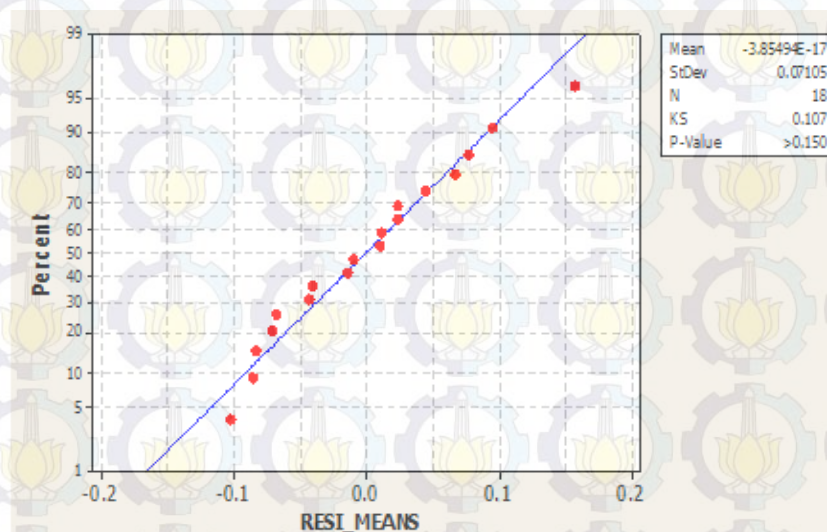
Uji kenormalan residual dilakukan dengan menggunakan uji *Kolmogorov-Smirnov* dan hipotesisnya adalah:

H_0 : residual berdistribusi normal

H_1 : residual berdistribusi yang lain

H_0 ditolak jika $p\text{-value}$ lebih kecil dari pada $\alpha = 0,05$.

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa dengan uji *Kolmogorov-Smirnov* diperoleh $p\text{-value} > 0,150$ yang lebih besar dari $\alpha = 0,05$, sehingga H_0 gagal ditolak atau *residual* mengikuti distribusi normal. Nilai rata-rata dari residual yang diperoleh adalah sebesar $-3,8549 \times 10^{-17}$, atau dapat dianggap nilai rata-rata residual tersebut sama dengan nol. Selain itu, deviasi standar residual yang diperoleh sebesar 0,071. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa asumsi residual berdistribusi normal dengan nilai rata-rata sangat kecil atau mendekati nol dengan variansi tertentu terpenuhi.



Gambar 4.8 *Plotting* distribusi normal

4.10. Percobaan Konfirmasi

Percobaan konfirmasi dilakukan untuk memvalidasi hasil yang telah diperoleh. Hal ini dilakukan dengan membandingkan interval keyakinan rata-rata FRG prediksi dengan interval keyakinan rata-rata FRG percobaan konfirmasi.



Percobaan konfirmasi dilakukan dengan menggunakan kombinasi seting parameter yang diperoleh dari hasil optimasi.

Pembandingan respon hasil kombinasi awal dengan respon hasil kombinasi optimum juga dilakukan pada penelitian ini. Kombinasi awal dan kombinasi optimum pada percobaan konfirmasi ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Kombinasi Parameter Proses untuk Kondisi Awal dan Kondisi Optimum

Parameter proses	Kombinasi awal		Kombinasi optimum	
	Nilai	Level	Nilai	Level
<i>Machining voltage/gap voltage (A)</i>	8	1	10	2
<i>Energy off time (B)</i>	23	2	21	1
<i>Energy on time (C)</i>	100	2	50	1
<i>Working energy/pulse current (D)</i>	20	2	25	3

Sumber: Hasil perhitungan

Hasil respon-respon dengan menggunakan kombinasi awal dan kombinasi optimum ditunjukkan pada Tabel 4.10. Data respon LPM dan respon KP percobaan konfirmasi selengkapnya dapat dilihat pada lampiran F.

Tabel 4.10 Hasil Respon-Respon dengan Menggunakan Kombinasi Awal dan Kombinasi Optimum

Respon	Kombinasi awal $A_1B_2C_2D_2$		Kombinasi optimum $A_2B_1C_1D_3$					
	Replikasi		Replikasi					
	1	2	1	2	3	4	5	6
LPM (mm^3/menit)	18,201	19,636	24,917	24,109	26,115	25,012	27,261	27,616
KP (mm)	8,27	7,21	6,42	6,66	6,44	6,92	6,40	6,21

Sumber: Hasil perhitungan dan pengukuran

Hasil rata-rata pada kombinasi awal dan kombinasi optimum untuk masing-masing respon ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Hasil Rata-Rata pada Kombinasi Awal dan Kombinasi Optimum

Respon	Kombinasi awal $A_1B_2C_2D_2$	Kombinasi optimum $A_2B_1C_1D_3$
	rata-rata	rata-rata
LPM (mm^3/menit)	18,919	25,839
KP (mm)	7,74	6,508

Sumber: Hasil perhitungan



Pembandingan antara interval keyakinan rata-rata FRG kombinasi awal dengan interval keyakinan rata-rata FRG kombinasi optimum dilakukan pada penelitian ini. Kombinasi awal menggunakan level 1 untuk parameter proses *machining voltage* atau *gap voltage* dan level 2 untuk parameter proses *energy off time*, *energy on time* dan *working energy* atau *pulse current*. Pembandingan tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 FRG pada kombinasi awal dan kombinasi optimum

	Kombinasi Awal $A_1B_2C_2D_2$	Kombinasi Optimum $A_2B_1C_1D_3$
FRG	0,5167	0,7380

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.12 menunjukkan bahwa nilai FRG pada kombinasi awal adalah sebesar 0,5176 dan FRG pada kombinasi optimum adalah sebesar 0,7380. Dengan demikian terjadi peningkatan FRG sebesar 42,8% dibandingkan dengan FRG pada kombinasi awal.

Penentuan interval keyakinan rata-rata FRG untuk percobaan konfirmasi dilakukan dengan terlebih dahulu menghitung banyaknya pengamatan efektif. Banyaknya pengamatan efektif dihitung dengan menggunakan persamaan 2.33 sebagai berikut:

$$n_{\text{eff}} = \frac{\text{jumlah total eksperimen}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan parameter} - \text{parameter untuk menduga rata - rata}}$$

$$n_{\text{eff}} = \frac{18 \times 2}{1 + (1 + 2 + 2 + 2)}$$

$$n_{\text{eff}} = 4,5$$

$$\text{Nilai } F_{(0,025;1;10)} = 6,94, MS_E = 0,002229 \text{ dan } r = 6$$

Perhitungan interval keyakinan rata-rata FRG percobaan konfirmasi dengan menggunakan persamaan 2.34 dan 2.35 adalah sebagai berikut:

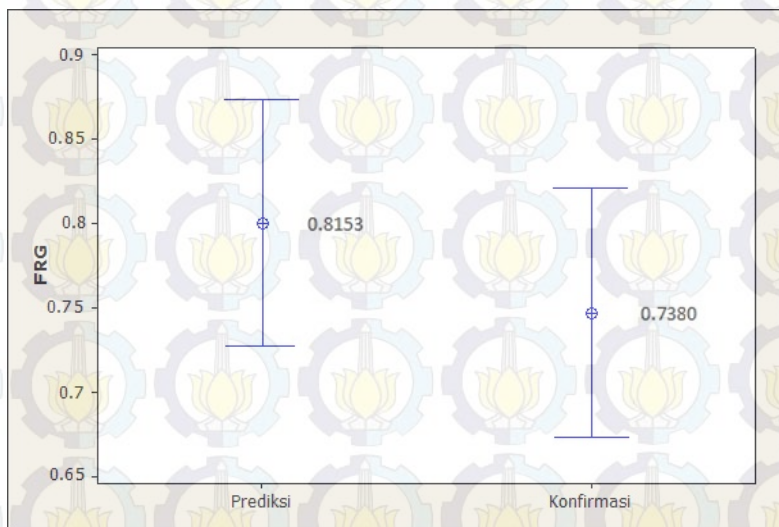
$$CI_{\text{konfirmasi}} = \sqrt{F_{\alpha;1;u_E} \cdot MS_E \left(\frac{1}{n_{\text{eff}}} + \frac{1}{r} \right)}$$



$$CI_{konfirmasi} = \sqrt{6,94 \cdot 0,002229 \cdot \frac{1}{4,5} + \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{6}}$$

$$CI_{konfirmasi} = \pm 0,0776$$

Dengan demikian interval keyakinan 97,5% rata-rata FRG konfirmasi adalah $0,7380 \pm 0,0776$ atau $0,6604 \leq FRG_{konfirmasi} \leq 0,8156$. *Plotting* interval keyakinan rata-rata FRG hasil prediksi dan rata-rata FRG percobaan konfirmasi ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 *Plotting* interval keyakinan rata-rata FRG hasil prediksi dan rata-rata FRG konfirmasi

Percobaan konfirmasi digunakan untuk memverifikasi bahwa nilai rata-rata yang ditaksir untuk parameter dan level yang telah dipilih dari percobaan adalah valid. Estimasi nilai rata-rata sebenarnya pada kondisi optimum didasarkan pada hasil nilai rata-rata yang diperoleh dari percobaan. Validasi ditetapkan jika rata-rata dari hasil percobaan konfirmasi berada didalam interval hasil prediksi.

Berdasarkan Gambar 4.9 menunjukkan bahwa interval keyakinan rata-rata FRG hasil konfirmasi (0,6604-0,8156) berada diantara interval keyakinan rata-rata FRG hasil prediksi (0,7567-0,8739). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa seting kombinasi level parameter pada kondisi optimum yang telah didapat adalah valid.



Tabel 4.11 menunjukkan bahwa rata-rata LPM pada percobaan dengan menggunakan seting kombinasi awal adalah sebesar $18,919 \text{ mm}^3/\text{min}$ dan dengan menggunakan seting kombinasi optimum menghasilkan rata-rata LPM sebesar $25,839 \text{ mm}^3/\text{min}$. Pada penelitian ini, percobaan dengan menggunakan seting kombinasi awal menghasilkan rata-rata KP sebesar $7,74 \text{ }\mu\text{m}$ dan dengan menggunakan seting kombinasi optimum menghasilkan rata-rata KP sebesar $6,508 \text{ }\mu\text{m}$. Rata-rata KP pada seting kombinasi optimum masih dalam batas pengerjaan kasar. Batas pengerjaan kasar tersebut memiliki tingkat kekasaran N9 hingga N10.

Perbedaan antara nilai respon kombinasi awal dengan nilai respon kombinasi optimum perlu diketahui. Oleh karena itu dilakukan pengujian secara statistik dengan menggunakan uji kesamaan rata-rata untuk masing-masing respon. Adapun langkah-langkah pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Uji kenormalan data
2. Uji dua variansi
3. Uji kesamaan rata-rata

Hasil pengujiannya adalah sebagai berikut:

1. Uji kenormalan data (menggunakan uji *Kolmogorov-Smirnov*)

- Hipotesis uji kenormalan data adalah:

H_0 : data berdistribusi normal

H_1 : data tidak berdistribusi normal

- Kriteria penolakan adalah:

Tolak H_0 , jika $p\text{-value} < \alpha$ dan $\alpha = 5\% = 0,05$

- Kesimpulan

Berdasarkan kriteria penolakan, hasil uji kenormalan data LPM dan KP ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Hasil uji kenormalan data

Respon	P-value	Kondisi H_0	Data
LPM _A	0,260	gagal ditolak	berdistribusi normal
LPM _O	0,320	gagal ditolak	berdistribusi normal
KP _A	0,260	gagal ditolak	berdistribusi normal
KP _O	0,276	gagal ditolak	berdistribusi normal

Sumber : Hasil perhitungan



Uji kenormalan data untuk respon LPM menunjukkan bahwa $p\text{-value}$ yang dihasilkan lebih besar dari $\alpha = 0,05$, sehingga hipotesis awal (H_0) gagal ditolak. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa respon LPM dengan menggunakan seting kombinasi awal maupun dengan menggunakan seting kombinasi optimum memiliki data berdistribusi normal.

Uji kenormalan data untuk respon KP menunjukkan bahwa $p\text{-value}$ yang dihasilkan lebih besar dari $\alpha = 0,05$, sehingga hipotesis awal (H_0) gagal ditolak. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa respon KP dengan menggunakan seting kombinasi awal maupun dengan menggunakan seting kombinasi optimum memiliki data berdistribusi normal. Hasil uji kenormalan data untuk respon LPM selengkapnya ditunjukkan pada Lampiran H, dan hasil uji kenormalan data untuk respon KP selengkapnya ditunjukkan pada Lampiran I.

2. Uji dua variansi (*two variances*)

- Hipotesis uji dua variansi adalah:

$$H_0 : s_1^2 = s_2^2$$

$$H_1 : s_1^2 \neq s_2^2$$

- Kriteria penolakan adalah:

Tolak H_0 , jika nilai $p\text{-value} < \alpha$ dan $\alpha = 5\% = 0,05$

- Kesimpulan

Berdasarkan kriteria penolakan, hasil uji dua variansi untuk respon LPM dan respon KP ditunjukkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Hasil uji dua variansi

Respon	P-value	Kondisi H_0	Variansi
LPM	0,911	gagal ditolak	Sama
KP	0,058	gagal ditolak	Sama

Sumber : Hasil perhitungan

Uji dua variansi untuk respon LPM menghasilkan $p\text{-value}$ sebesar 0,911, dan lebih besar dari $\alpha = 0,05$. Dengan demikian hipotesis awal (H_0) gagal ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa respon LPM dengan menggunakan seting kombinasi awal memiliki variansi yang sama dengan respon LPM dengan



menggunakan seting kombinasi optimum. Hasil uji dua variansi untuk respon LPM selengkapnya ditunjukkan pada Lampiran H.

Uji dua variansi untuk respon KP menghasilkan *p-value* sebesar 0,058, dan lebih besar dari $\alpha = 0,05$. Dengan demikian hipotesis awal (H_0) gagal ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa respon KP dengan menggunakan seting kombinasi awal memiliki variansi yang sama dengan respon KP dengan menggunakan seting kombinasi optimum. Hasil uji dua variansi untuk respon KP selengkapnya ditunjukkan pada Lampiran I.

3. Uji kesamaan rata-rata (*two sample t-test*)

Untuk membuktikan bahwa LPM hasil optimum lebih tinggi daripada LPM hasil kombinasi awal, maka dilakukan uji kesamaan rata-rata dengan menggunakan *two sample t-test*.

- Hipotesis pengujiannya adalah:

$$H_0 : \mu_{LPM A} = \mu_{LPM O}$$

$$H_1 : \mu_{LPM A} < \mu_{LPM O}$$

- Kriteria penolakan adalah:

$$H_0 \text{ ditolak jika nilai } p\text{-value} < \alpha \text{ dan } \alpha = 5\% = 0,05$$

- Kesimpulan

Berdasarkan kriteria penolakan, hasil dari uji kesamaan rata-rata respon LPM ditunjukkan pada Tabel 4.15.

Untuk membuktikan bahwa KP hasil kombinasi awal lebih besar daripada KP hasil kombinasi optimum, maka dilakukan uji kesamaan rata-rata dengan menggunakan *two sample t-test*.

- Hipotesis pengujiannya adalah:

$$H_0 : \mu_{KP A} = \mu_{KP O}$$

$$H_1 : \mu_{KP A} > \mu_{KP O}$$

- Kriteria penolakan adalah:

$$H_0 \text{ ditolak jika nilai } p\text{-value} < \alpha \text{ dan } \alpha = 5\% = 0,05$$

- Kesimpulan

Berdasarkan kriteria penolakan, hasil dari uji kesamaan rata-rata respon KP ditunjukkan pada Tabel 4.15.



Tabel 4.15 Hasil uji kesamaan rata-rata

Respon	p-value	Kondisi H_0	Rata-rata
LPM	0,000	ditolak	$LPM_A < LPM_O$
KP	0,004	ditolak	$KP_A > KP_O$

Sumber: Hasil perhitungan

Uji kesamaan rata-rata untuk respon LPM menghasilkan p-value sebesar 0,000 dan lebih kecil dari $\alpha = 0,05$. Dengan demikian hipotesis awal (H_0) ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa secara statistik rata-rata respon LPM dengan menggunakan seting kombinasi awal lebih kecil dibandingkan dengan rata-rata respon LPM dengan menggunakan seting kombinasi optimum. Rata-rata respon LPM dengan menggunakan seting kombinasi awal adalah sebesar 18,919 mm³/min dan rata-rata respon LPM dengan menggunakan seting kombinasi optimum adalah sebesar 25,839 mm³/min. Dengan demikian, rata-rata respon LPM mengalami peningkatan sebesar 36,5%. Hasil uji kesamaan rata-rata untuk respon LPM selengkapnya ditunjukkan pada Lampiran H.

Uji kesamaan rata-rata untuk respon KP menghasilkan p-value sebesar 0,004 dan lebih kecil dari $\alpha = 0,05$. Dengan demikian hipotesis awal (H_0) ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa secara statistik rata-rata respon KP dengan menggunakan seting kombinasi awal lebih besar dibandingkan dengan rata-rata respon KP dengan menggunakan seting kombinasi optimum. Rata-rata respon KP dengan menggunakan seting kombinasi awal adalah sebesar 7,74 μm dan rata-rata respon KP dengan menggunakan seting kombinasi optimum adalah sebesar 6,508 μm . Dengan demikian, rata-rata respon KP mengalami penurunan sebesar 18,9%. Hasil uji kesamaan rata-rata untuk respon KP selengkapnya dapat ditunjukkan pada Lampiran I.

4.11. Pembahasan Parameter-Parameter Proses Terhadap Respon Individu

Berdasarkan analisis variansi yang telah dilakukan, dapat diketahui pengaruh masing-masing parameter proses *machining voltage* atau *gap voltage*, *energy off time*, *energy on time* dan *working energy* atau *pulse current* terhadap respon LPM dan KP. Rincian analisis variansi dan perhitungan persen kontribusi parameter-parameter tersebut ditunjukkan pada Lampiran G. Tabel 4.16



menunjukkan parameter-parameter proses yang berpengaruh terhadap respon secara individu.

Tabel 4.16 Parameter proses yang berpengaruh terhadap respon individu

Parameter Proses	LPM		KP	
	F _{hitung}	P _{-value}	F _{hitung}	P _{-value}
<i>Machining voltage/gap voltage</i> (A)	8,79	0,014	4,7	0,05*
<i>Energy off time</i> (B)	4,11	0,05	17,28	0,001
<i>Energy on time</i> (C)	1,61	0,248**	16,52	0,001
<i>Working energy/pulse current</i> (D)	106,3	0,000	9,04	0,006

Sumber: Hasil perhitungan

Keterangan:

* signifikan pada $\alpha = 5\%$

** tidak signifikan

a. *Machining voltage* atau *gap voltage* (A)

Machining voltage atau *gap voltage* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon LPM dan KP. Pengaturan dengan nilai tegangan referensi yang lebih besar akan meningkatkan besarnya loncatan bunga api selama proses pemesinan EDM *sinking*. Dengan demikian, proses pengikisan benda kerja menjadi semakin cepat dan waktu pengerjaan menjadi semakin singkat. Hal ini akan menyebabkan LPM menjadi lebih besar, tetapi KP benda kerja menjadi lebih tinggi.

b. *Energy off time* (B)

Energy off time memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon LPM dan KP. Pengaturan dengan nilai yang lebih rendah pada proses pemesinan EDM *sinking* dapat menyebabkan waktu loncatan bunga api listrik menjadi semakin cepat. Akibatnya proses pembilasan geram (*flushing*) berjalan lebih sempurna karena fluida dielektrik memiliki cukup waktu untuk membawa geram hasil pengikisan benda kerja. Loncatan bunga api listrik berhenti ketika memasuki saat *off time*, sehingga tidak terjadi proses pemotongan. Pada saat *off time* tidak hanya terjadi *flushing*, tetapi juga terjadi ionisasi fluida dielektrik yang bertujuan untuk mempersiapkan jalur loncatan busur listrik. Penurunan nilai *energy off time* dapat mempercepat waktu pemesinan dan meningkatkan



stabilitas pengikisan benda kerja. Nilai *energy off time* terbaik yang dipilih pada level rendah sehingga dapat meningkatkan LPM dan meminimalkan KP.

c. *Energy on time* (C)

Energy on time memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon LPM dan KP. Pengaturan nilai *on time* yang lebih besar akan mengakibatkan waktu peloncatan bunga api listrik menjadi semakin lama. Dengan semakin banyaknya volume benda kerja yang terkikis, maka waktu proses pengerjaan menjadi semakin singkat. Waktu pengerjaan yang singkat akan menyebabkan LPM menjadi lebih besar. Selain itu, energi yang lebih besar akan membuat kawah yang terbentuk pada permukaan benda kerja menjadi semakin dalam, sehingga KP yang dihasilkan menjadi semakin tinggi. Oleh karena itu, LPM yang maksimal akan diperoleh jika nilai *on time* diatur lebih besar. KP yang minimal akan diperoleh bila nilai *on time* diatur lebih kecil.

d. *Working energy* atau *pulse current* (D)

Working energy atau *pulse current* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon LPM dan KP. Pengaturan nilai *working energy* atau *pulse current* yang lebih besar akan membuat energi yang digunakan untuk mengikis benda kerja menjadi lebih besar, sehingga waktu pengerjaan menjadi semakin singkat akibatnya LPM akan meningkat dan KP benda kerja semakin kasar. Nilai parameter *working energy* atau *pulse current* yang rendah dapat menyebabkan proses loncatan bunga api semakin lama. Akibatnya LPM akan menurun dan KP benda kerja semakin rendah.

4.12. Hasil Optimasi

Tabel 4.17 menunjukkan bahwa perbandingan dari respon-respon LPM dan KP pada kombinasi awal dan kombinasi optimum, serta FRG hasil kombinasi awal, prediksi dan percobaan konfirmasi.

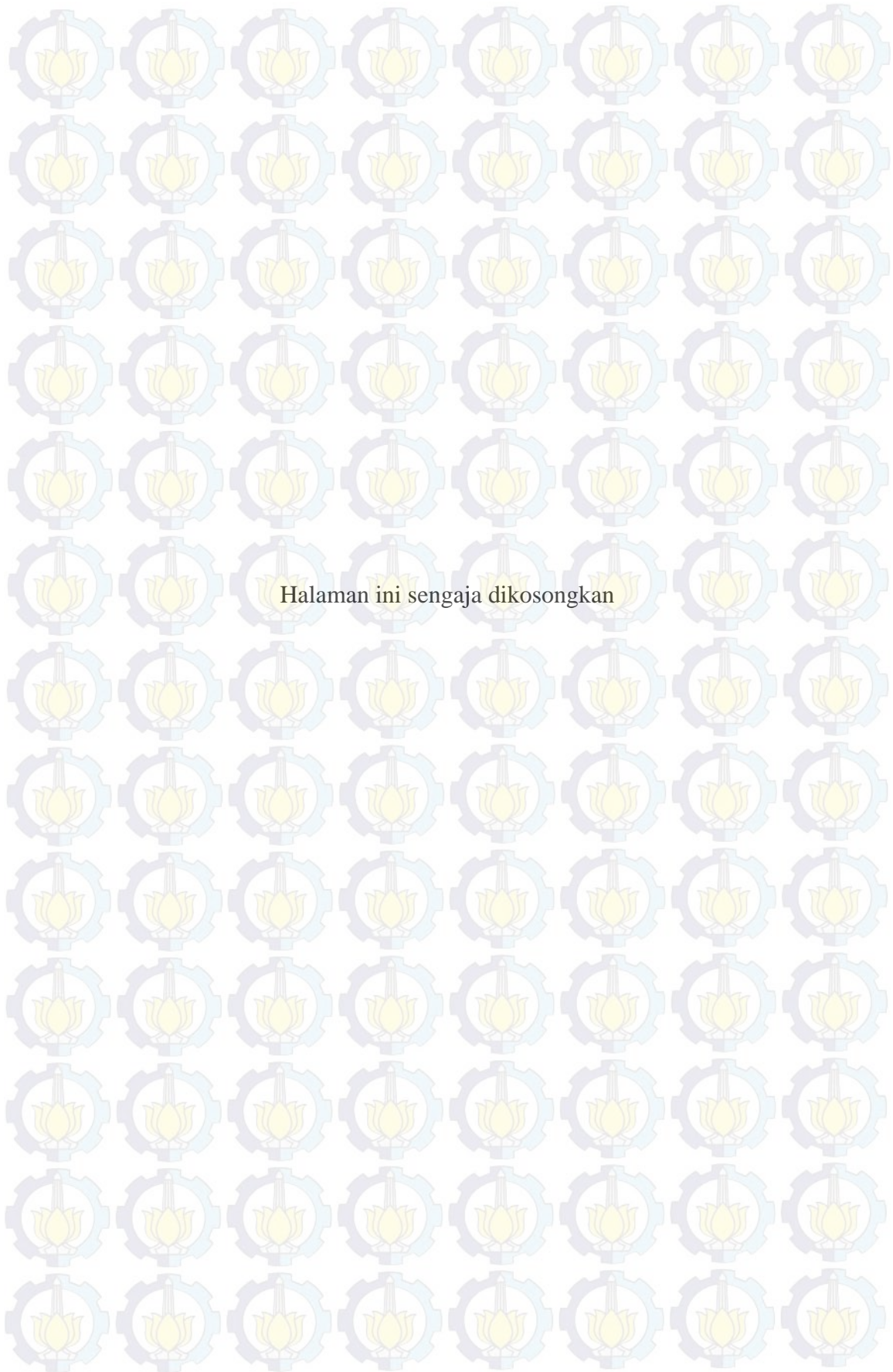


Tabel 4.17 Hasil optimasi respon-respon LPM dan KP

	Kombinasi awal	Kombinasi optimum	
		Prediksi	Konfirmasi
Seting level parameter proses	A ₁ B ₂ C ₂ D ₂	A ₂ B ₁ C ₁ D ₃	A ₂ B ₁ C ₁ D ₃
LPM (mm ³ /min)	18,919		25,839
KP (mm)	7,74		6,508
FRG	0,5167	0,8153	0,7380
Peningkatan LPM	36,5%		
Penurunan KP	18,9%		
Peningkatan FRG	42,8%		

Sumber: Hasil perhitungan

Dari Tabel 4.17 menunjukkan bahwa LPM meningkat dari 18,919 mm³/min menjadi 25,839 mm³/min, dan KP menurun dari 7,74 mm menjadi 6,508 mm. Nilai FRG pada kombinasi awal adalah sebesar 0,5167 dan FRG pada kombinasi optimum adalah sebesar 0,7380, sehingga terjadi peningkatan sebesar 42,8%.



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR LAMPIRAN

	Hal
Lampiran A Hasil Penimbangan Berat Awal Benda Kerja	L-1
Lampiran B Hasil Pencatatan Waktu Pemesinan EDM <i>Sinking</i>	L-2
Lampiran C Hasil Penimbangan Berat Akhir Benda Kerja	L-3
Lampiran D Hasil Pengukuran KP Benda Kerja	L-4
Lampiran E Hasil Perhitungan LPM.....	L-5
Lampiran F Hasil Uji Konfirmasi	L-6
Lampiran G Analisis Parameter Respon Individu	L-8
Lampiran H Hasil Uji Pembandingan Rata-Rata LPM Dengan Menggunakan Seting Kombinasi Awal dan Rata-Rata LPM Dengan Menggunakan Seting Parameter Kombinasi Optimum ...	L-10
Lampiran I Hasil Uji Pembandingan Rata-Rata KP Dengan Menggunakan Seting kombinasi awal dan rata-rata KP Dengan Menggunakan Seting Parameter Kombinasi Optimum.....	L-13
Lampiran J Karakteristik Baja AISI 4140.....	L-16

Lampiran A:

Hasil Penimbangan Berat Awal Benda Kerja

Tabel A. Penimbangan berat awal benda kerja hasil percobaan

Kombinasi parameter ke-	Level dari parameter				Hasil penimbangan		Rata-rata (gr)
	A	B	C	D	Replikasi 1	Replikasi 2	
					(gr)	(gr)	
1	1	1	1	1	45,17	45,22	45,20
2	1	1	2	2	44,37	44,62	44,50
3	1	1	3	3	45,26	44,35	44,80
4	1	2	1	1	44,51	44,49	44,51
5	1	2	2	2	44,72	45,09	44,90
6	1	2	3	3	45,27	45,17	45,23
7	1	3	1	2	44,69	45,17	44,95
8	1	3	2	3	44,57	44,75	44,67
9	1	3	3	1	44,50	44,03	44,26
10	2	1	1	3	43,82	45,13	44,47
11	2	1	2	1	45,16	44,62	44,93
12	2	1	3	2	44,86	44,31	44,59
13	2	2	1	2	45,19	45,30	45,24
14	2	2	2	3	44,40	44,55	44,49
15	2	2	3	1	44,41	44,41	44,42
16	2	3	1	3	45,22	44,58	44,90
17	2	3	2	1	45,23	44,73	44,98
18	2	3	3	2	45,27	44,50	44,89

Lampiran B:

Hasil Pencatatan Waktu Pemessinan EDM *Sinking*

Tabel B. Pencatatan waktu pemessinan EDM *sinking* hasil percobaan

Kombinasi parameter ke-	Level dari parameter				Waktu pengerjaan (menit)		Rata-rata (menit)
	A	B	C	D	Replikasi 1	Replikasi 2	
1	1	1	1	1	60,57	68,38	64,5
2	1	1	2	2	36,40	40,58	38,5
3	1	1	3	3	26,00	25,04	25,5
4	1	2	1	1	49,02	53,00	51
5	1	2	2	2	33,06	35,00	34
6	1	2	3	3	22,56	26,42	24,5
7	1	3	1	2	30,05	35,00	32,5
8	1	3	2	3	22,00	23,03	22,5
9	1	3	3	1	45,08	46,00	45,5
10	2	1	1	3	28,00	27,00	27,5
11	2	1	2	1	45,59	43,38	44,5
12	2	1	3	2	30,04	32,00	31
13	2	2	1	2	28,00	27,02	27,5
14	2	2	2	3	22,00	20,00	21
15	2	2	3	1	37,59	41,40	39,5
16	2	3	1	3	24,00	22,00	23
17	2	3	2	1	36,00	39,02	37,5
18	2	3	3	2	25,00	26,00	25,5

Lampiran C:

Hasil Penimbangan Berat Akhir Benda Kerja

Tabel C. Penimbangan berat akhir benda kerja hasil percobaan

Kombinasi Parameter Ke-	Level dari parameter				Hasil penimbangan		Rata-rata (gr)
	A	B	C	D	Replikasi 1	Replikasi 2	
					(gr)	(gr)	
1	1	1	1	1	40.33	40.20	40.27
2	1	1	2	2	39.20	39.00	39.10
3	1	1	3	3	39.85	39.64	39.74
4	1	2	1	1	38.97	39.05	39.01
5	1	2	2	2	40.01	39.70	39.85
6	1	2	3	3	39.86	39.62	39.74
7	1	3	1	2	39.73	39.98	39.85
8	1	3	2	3	39.76	40.30	40.03
9	1	3	3	1	39.82	39.15	39.49
10	2	1	1	3	38.45	40.11	39.28
11	2	1	2	1	40.38	38.44	39.41
12	2	1	3	2	39.46	39.53	39.49
13	2	2	1	2	40.18	40.34	40.26
14	2	2	2	3	39.92	39.32	39.62
15	2	2	3	1	39.69	39.72	39.71
16	2	3	1	3	40.07	39.73	39.90
17	2	3	2	1	41.17	40.90	41.03
18	2	3	3	2	40.11	40.32	40.22

Lampiran D:

Hasil Pengukuran Kekasaran Permukaan (KP) Benda Kerja

Tabel D. Pengukuran KP benda kerja hasil percobaan

Seting parameter, kombinasi ke-	Machining voltage/gap voltage (V)	Energy off time (μs)	Energy on time (μs)	Working energy/pulse current (A)	KP Replikasi 1 (μm)	KP Replikasi 2 (μm)	Rata-rata KP (μm)
1	8	21	50	15	4.82	4.93	4.875
2	8	21	100	20	6.60	6.51	6.555
3	8	21	150	25	6.91	8.02	7.465
4	8	23	50	15	7.15	5.59	6.370
5	8	23	100	20	8.27	7.21	7.740
6	8	23	150	25	9.19	8.99	9.090
7	8	25	50	20	8.02	7.59	7.805
8	8	25	100	25	7.63	7.41	7.520
9	8	25	150	15	7.21	8.53	7.870
10	10	21	50	25	4.72	5.12	4.920
11	10	21	100	15	4.56	5.46	5.010
12	10	21	150	20	6.66	6.23	6.445
13	10	23	50	20	5.18	7.11	6.145
14	10	23	100	25	8.27	7.18	7.725
15	10	23	150	15	6.62	7.40	7.010
16	10	25	50	25	6.15	6.92	6.535
17	10	25	100	15	6.10	5.63	5.865
18	10	25	150	20	11.63	10.18	10.905

Lampiran E:

Hasil Perhitungan LPM

Tabel E. Perhitungan LPM benda kerja hasil percobaan

No	Berat benda kerja			Berat jenis AISI 4140	Volume (mm ³)	Waktu (menit)	Rata-rata LPM (mm ³ /menit)
	W_i (gr)	W_f (gr)	ΔW (gr)	(gram/mm ³)			
1	45,20	40,27	4,93	0,00785	628,025	64,5	9,736
2	44,50	39,10	5,41	0,00785	687,898	38,5	17,867
3	44,80	39,74	5,06	0,00785	644,586	25,5	25,278
4	44,51	39,01	5,50	0,00785	700,637	51,0	13,738
5	44,90	39,85	5,05	0,00785	643,185	34,0	18,917
6	45,23	39,74	5,49	0,00785	699,490	24,5	28,551
7	44,95	39,85	5,10	0,00785	649,554	32,5	19,986
8	44,67	40,03	4,64	0,00785	590,624	22,5	26,250
9	44,26	39,49	4,78	0,00785	608,471	45,5	13,373
10	44,47	39,28	5,20	0,00785	661,911	27,5	24,069
11	44,93	39,41	5,51	0,00785	702,191	44,5	15,780
12	44,59	39,49	5,10	0,00785	649,439	31,0	20,950
13	45,24	40,26	4,99	0,00785	635,159	27,5	23,097
14	44,49	39,62	4,87	0,00785	619,745	21,0	29,512
15	44,42	39,71	4,71	0,00785	599,745	39,5	15,183
16	44,90	39,90	5,00	0,00785	636,662	23,0	27,681
17	44,98	41,03	3,94	0,00785	502,420	37,5	13,398
18	44,89	40,22	4,68	0,00785	595,707	25,5	23,361

Lampiran F:

Hasil Uji Konfirmasi

Hasil penimbangan berat awal benda kerja

Tabel F1. Penimbangan berat awal benda kerja hasil uji konfirmasi

No	Level dari parameter				Hasil penimbangan						Rata-rata (gr)
	A	B	C	D	Replikasi 1	Replikasi 2	Replikasi 3	Replikasi 4	Replikasi 5	Replikasi 6	
					(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	
1	2	1	1	3	44,81	45,43	45,28	44,98	45,40	45,55	45,24

Hasil Pencatatan waktu pemesinan EDM *sinking*

Tabel F2. Pencatatan waktu pemesinan EDM *sinking* hasil uji konfirmasi

No	Level dari parameter				Waktu pengerjaan						Rata-rata (menit)
	A	B	C	D	Replikasi 1	Replikasi 2	Replikasi 3	Replikasi 4	Replikasi 5	Replikasi 6	
					(menit)	(menit)	(menit)	(menit)	(menit)	(menit)	
1	2	1	1	3	25,58	26,22	26,14	26	24,58	24,54	25,34

Hasil Penimbangan berat akhir benda kerja

Tabel F3. Penimbangan berat akhir benda kerja hasil uji konfirmasi

No	Level dari parameter				Hasil penimbangan						Rata-rata (gr)
	A	B	C	D	Replikasi 1	Replikasi 2	Replikasi 3	Replikasi 4	Replikasi 5	Replikasi 6	
					(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	
1	2	1	1	3	39,92	40,32	40,16	39,88	40,14	40,23	40,11

Hasil Perhitungan LPM

Tabel F4. Perhitungan LPM benda kerja hasil uji konfirmasi

No	Berat benda kerja			Berat jenis	Volume (mm ³)	Waktu (menit)	Rata-rata LPM (mm ³ /menit)
	W_i (gr)	W_f (gr)	ΔW (gr)	AISI 4140 (gram/mm ³)			
1	44,81	39,92	4,89	0,00785	622,930	24,58	25,343
2	45,43	40,32	5,11	0,00785	650,955	26,22	24,825
3	45,28	40,16	5,12	0,00785	652,866	26,14	24,974
4	44,98	39,88	5,10	0,00785	650,318	26	25,012
5	45,40	40,14	5,26	0,00785	652,866	24,58	27,261
6	45,55	40,23	5,32	0,00785	650,318	24,54	27,616

Hasil Pengukuran KP Benda Kerja

Tabel F5. KP benda kerja hasil uji konfirmasi

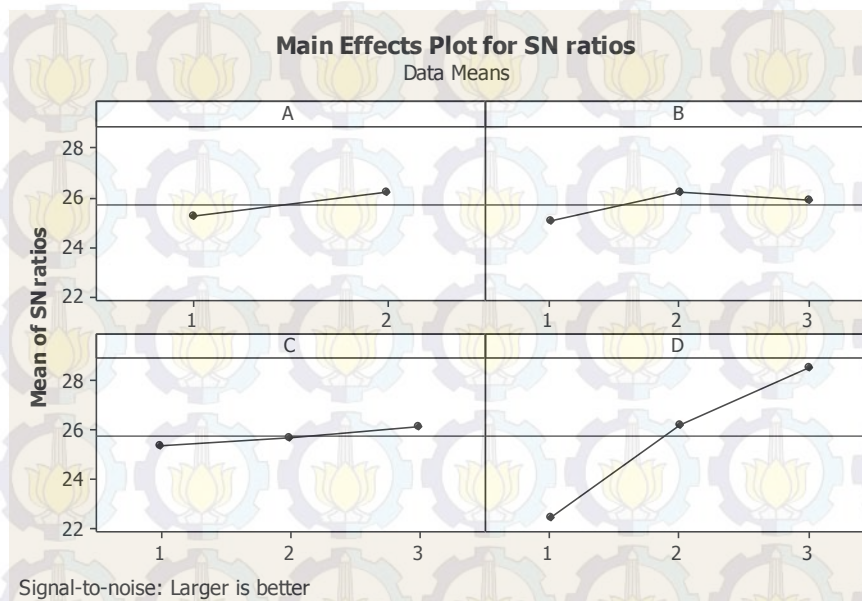
Seting parameter, kombinasi ke-	Machining voltage/ gap voltage (V)	Energy off time (μs)	Energy on time (μs)	Working energy/ pulse current (A)	Rata-rata KP (μm)
1	10	21	50	25	6,42
2	10	21	50	25	6,66
3	10	21	50	25	6,44
4	10	21	50	25	6,92
5	10	21	50	25	6,40
6	10	21	50	25	6,21

Lampiran G:

Analisis Parameter Respon Individu

Tabel G-1 Analisis Variansi Rasio S/N dan Persen Kontribusi Respon LPM

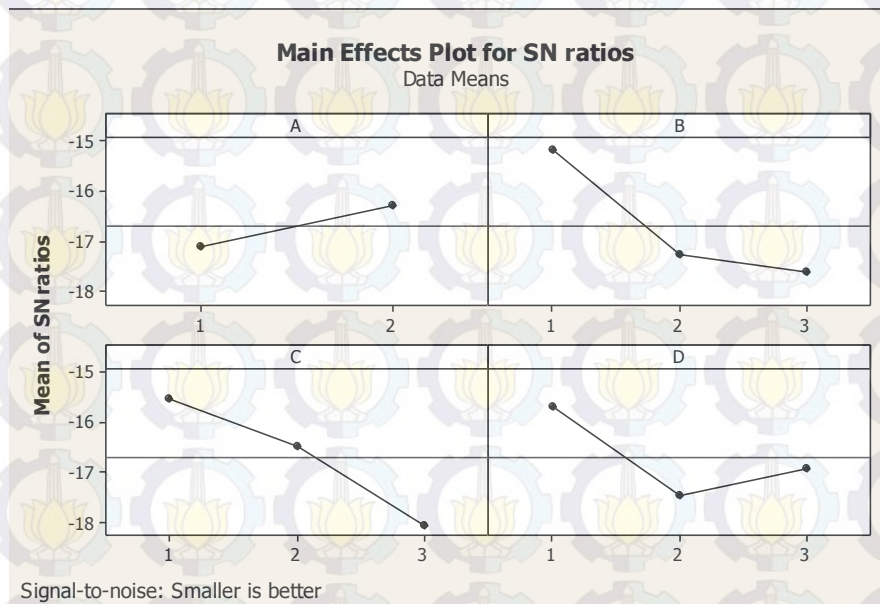
Source	DF	Sum of square	Mean of square	F	P	Kontribusi (%)
A	1	4,652	4,6522	8,79	0,014	3,21
B	2	4,354	2,1771	4,11	0,05	2,56
C	2	1,70000	0,850200	1,61	0,248	0,50
D	2	112,56700	56,2835	106,3	0,000	86,7
Error	10	5,29500	0,5295			7,00
Total	17	128,56900				100,00



Gambar G-1 Plot rasio S/N untuk respon LPM

Tabel G-2 Analisis Variansi Rasio S/N dan Persen Kontribusi Respon KP

Source	DF	Sum of square	Mean of square	F	P	Kontribusi (%)
A	1	2,646	2,6463	4,7	0,055	3,69
B	2	17,28	9,7166	17,28	0,001	28,61
C	2	18,58700	9,293600	16,52	0,001	30,92
D	2	10,17500	5,0873	9,04	0,006	16,03
Error	10	5,62500	0,5625			20,75
Total	17	56,46600				100,00



Gambar G-2 Plot rasio S/N untuk respon KP

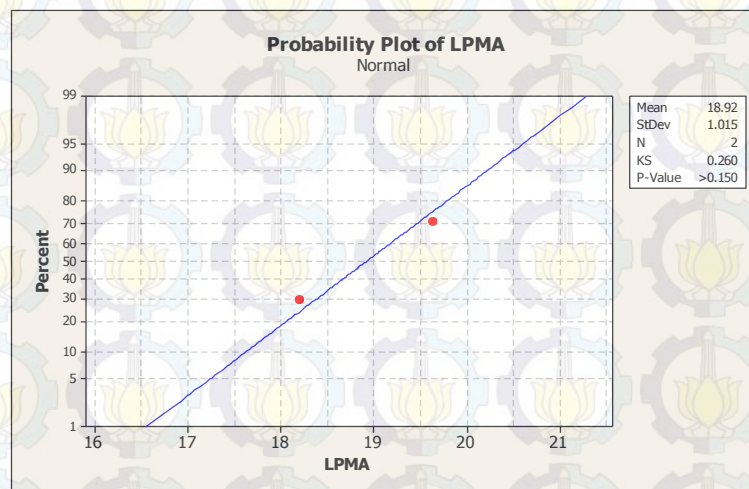
Lampiran H:

Hasil uji pembandingan rata-rata LPM dengan menggunakan seting kombinasi awal dan rata-rata LPM dengan menggunakan seting parameter kombinasi optimum

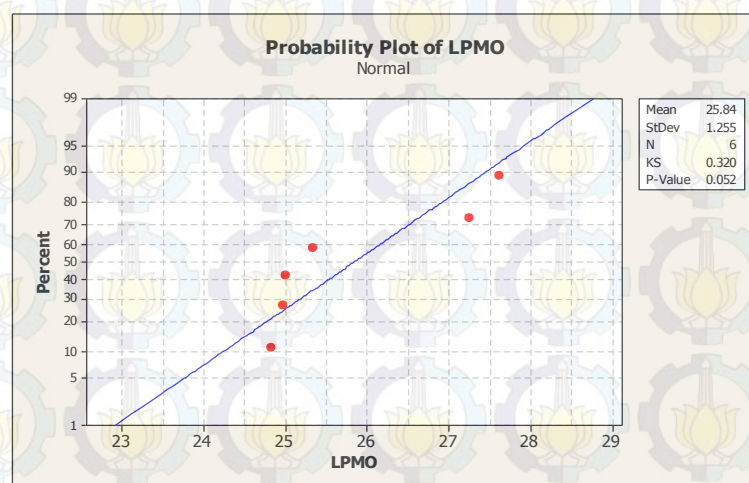
Langkah-langkah dari uji kesamaan rata-rata adalah sebagai berikut:

a. Uji Kenormalan Data

Plot grafik untuk pengujian kenormalan data dengan menggunakan uji *Kolmogorov-Smirnov* ditunjukkan oleh gambar berikut:



Gambar G-1 Plot *residual fitted values* untuk LPM dengan menggunakan kombinasi awal



Gambar G-2 Plot *residual fitted values* untuk LPM dengan menggunakan kombinasi optimum

Nilai $p\text{-value}$ yang lebih besar dari $\alpha = 0,05$ menyebabkan hipotesis awal gagal ditolak, Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa rata-rata LPM dengan menggunakan seting parameter kombinasi awal LPM dan rata-rata LPM dengan menggunakan seting parameter kombinasi optimum berdistribusi normal.

b. Uji dua variansi

Test and CI for Two Variances: LPMA, LPMO				
Method				
Null hypothesis	Sigma(LPMA) / Sigma(LPMO) = 1			
Alternative hypothesis	Sigma(LPMA) / Sigma(LPMO) not = 1			
Significance level	Alpha = 0.05			
Statistics				
Variable	N	StDev	Variance	
LPMA	2	1.015	1.029	
LPMO	6	1.255	1.576	
Ratio of standard deviations = 0.808				
Ratio of variances = 0.653				
95% Confidence Intervals				
Distribution of Data	CI for StDev Ratio		CI for Variance Ratio	
Normal	(0.256, 24.540)		(0.065, 602.213)	
Continuous	(0.253, *)		(0.064, *)	
Tests				
Method	DF1	DF2	Test Statistic	P-Value
F Test (normal)	1	5	0.65	0.911
Levene's Test (any continuous)	1	6	0.05	0.824

Hasil uji dua variansi menunjukkan bahwa nilai $p\text{-value}$ lebih besar dari $\alpha = 0,05$, sehingga hipotesis awal gagal ditolak. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa rata-rata LPM dengan menggunakan seting parameter kombinasi awal dan rata-rata LPM dengan menggunakan seting parameter kombinasi optimum memiliki variansi yang sama.

c. Uji kesamaan rata-rata

Two-Sample T-Test and CI: LPMA, LPMO

Two-sample T for LPMA vs LPMO

	N	Mean	StDev	SE Mean
LPMA	2	18.92	1.01	0.72
LPMO	6	25.84	1.26	0.51

Difference = μ (LPMA) - μ (LPMO)

Estimate for difference: -6.921

95% upper bound for difference: -4.987

T-Test of difference = 0 (vs <): T-Value = -6.96 P-Value = 0.000 DF = 6

Both use Pooled StDev = 1.2185

Dapat disimpulkan bahwa hasil uji rata-rata LPM diperoleh *p-value* dengan nilai 0,000 maka nilai *p-value* lebih kecil dari $\alpha = 0,05$, sehingga keputusannya hipotesis awal ditolak. Dengan demikian, bahwa secara statistik rata-rata LPM dengan menggunakan seting parameter kombinasi awal lebih kecil dibandingkan dengan LPM dengan menggunakan seting kombinasi optimum.

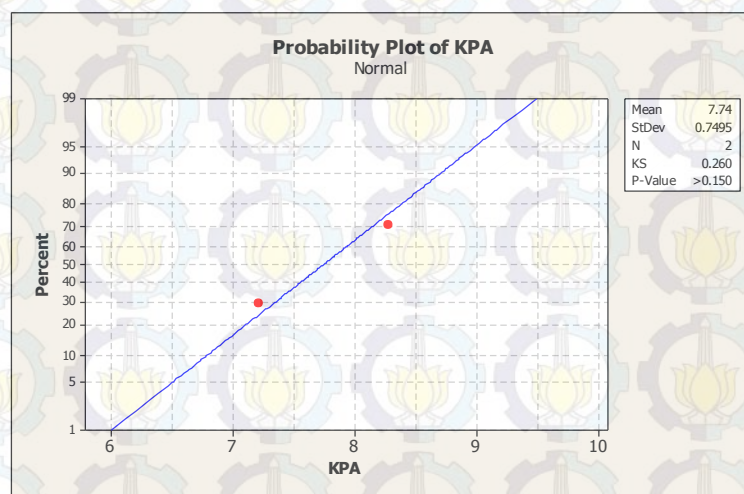
Lampiran I:

Hasil uji pembandingan rata-rata KP dengan menggunakan seting kombinasi awal dan rata-rata KP dengan menggunakan seting parameter kombinasi optimum

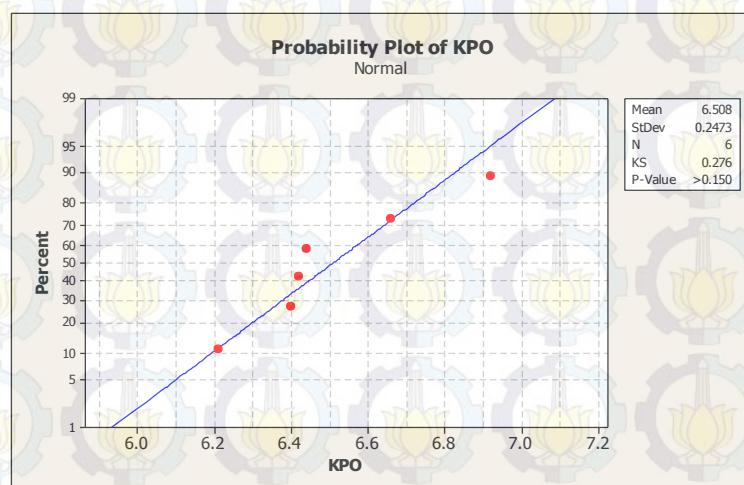
Langkah-langkah dari uji kesamaan rata-rata adalah sebagai berikut:

a. Uji Kenormalan Data

Plot grafik untuk pengujian kenormalan data dengan menggunakan uji *Kolmogorov-Smirnov* ditunjukkan oleh gambar berikut:



Gambar H-2 Plot uji kenormalan data KP dengan menggunakan seting kombinasi awal



Gambar H-2 Plot uji kenormalan data KP dengan menggunakan seting kombinasi optimum

Nilai $p\text{-value}$ yang lebih besar dari 0,05 menyebabkan hipotesis awal gagal ditolak. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa rata-rata KP dengan seting parameter kombinasi awal KP dengan rata-rata KP dengan seting parameter kombinasi optimum berdistribusi normal.

b. Uji dua variansi

Test and CI for Two Variances: KPA, KPO					
Method					
Null hypothesis	Sigma(KPA) / Sigma(KPO) = 1				
Alternative hypothesis	Sigma(KPA) / Sigma(KPO) not = 1				
Significance level	Alpha = 0.05				
Statistics					
Variable	N	StDev	Variance		
KPA	2	0.750	0.562		
KPO	6	0.247	0.061		
Ratio of standard deviations = 3.031					
Ratio of variances = 9.189					
95% Confidence Intervals					
Distribution of Data	CI for StDev Ratio		CI for Variance Ratio		
Normal	(0.958, 92.039)		(0.918, 8471.089)		
Continuous	(1.039, *)		(1.079, *)		
Tests					
Method	DF1	DF2	Test Statistic	P-Value	
F Test (normal)	1	5	9.19	0.058	
Levene's Test (any continuous)	1	6	6.69	0.041	

Hasil uji dua variansi menunjukkan bahwa nilai $p\text{-value}$ lebih besar dari $\alpha = 0,05$, sehingga hipotesis awal gagal ditolak. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa rata-rata KP dengan menggunakan seting parameter kombinasi awal dan rata-rata KP dengan menggunakan seting parameter kombinasi optimum memiliki variansi yang sama.

c. Uji kesamaan rata-rata

Two-Sample T-Test and CI: KPA, KPO

Two-sample T for KPA vs KPO

	N	Mean	StDev	SE Mean
KPA	2	7.740	0.750	0.53
KPO	6	6.508	0.247	0.10

Difference = μ (KPA) - μ (KPO)

Estimate for difference: 1.232

95% lower bound for difference: 0.628

T-Test of difference = 0 (vs >): T-Value = 3.97 P-Value = 0.004 DF = 6

Both use Pooled StDev = 0.3802

Dapat disimpulkan bahwa hasil uji rata-rata KP diperoleh *p-value* dengan nilai 0,004 maka nilai *p-value* lebih kecil dari $\alpha = 0,05$, sehingga keputusannya hipotesis awal ditolak. Dengan demikian, bahwa secara statistik rata-rata KP dengan menggunakan seting parameter kombinasi awal lebih besar dibandingkan dengan rata-rata KP dengan menggunakan seting kombinasi optimum.

Lampiran J: Karakteristik Baja AISI 4140 (certificate)





PARAGON
Specialty Metals and Services



Certificate

This is to certify that the material which we supply is guaranteed to meet the specification as mentioned below :

Grade Ravne : VCMO140	JIS SCM 440	Customer : FAIZAL IBRAHIM	
Hardness : 290 - 330 HB		DO / Date :	
Typical chemical analysis 0.41%C-0.30%Si-0.75%Mn- 1.05%Cr-0.25%Mo		Ø 25 x 2016 mm	1 Pcs
Typical microstructure 			
Hormat Saya,  Kunchoro Hasea			

07 MEI 2013

